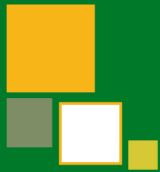




Escuela
Politécnica
Superior

Aprovechamiento energético de los residuos



Máster en Gestión de la Edificación

Trabajo Fin de Máster

Autor:

Irene María Quesada Granja

Tutor/es:

Eduardo Maestre García

Noviembre 2018



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar, a mi tutor Eduardo Maestre García por toda la atención y la ayuda ofrecida a lo largo de estos meses.

A la Universidad de Alicante y a la Dirección General de Cooperación y Solidaridad de la Generalitat Valenciana, por fomentar el estudio de la integración de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

También quiero agradecer a mi familia por todo el apoyo recibido, así como a mis amigos y compañeros, quienes han hecho este camino más ameno.

Resumen y palabras clave

El aprovechamiento energético de los residuos que no puedan ser reutilizados o reciclados por causas técnicas son una alternativa sostenible al empleo de energías fósiles, de acuerdo con lo establecido por la UE y la jerarquía de gestión de residuos. Es por tanto necesario fomentar en España políticas prioritarias de aprovechamiento energético de los residuos, tanto por cuestiones de compromiso por el cumplimiento de la normativa europea de reducción de emisiones, como por constituir un recurso energético autóctono, en un país con fuentes propias de energía muy limitadas.

Residuos sólidos urbanos, aprovechamiento energético de los residuos, objetivos de desarrollo sostenible, economía circular, economía baja en carbono, jerarquía de residuos.

Índice

1	Cuestiones generales.....	15
1.1	Introducción	15
1.2	Estado del arte.....	16
1.3	Objetivos.....	17
1.4	Metodología	17
2	Los residuos y su papel en la economía	19
2.1	Tipos de residuos.....	19
2.2	Los residuos sólidos urbanos.....	22
2.3	La jerarquía de gestión de residuos	24
2.3.1	Descripción de las prioridades	25
2.3.2	Observaciones	27
2.4	Economías sostenibles	27
2.4.1	La economía circular.....	28
2.4.2	La economía baja en carbono.....	29
3	El aprovechamiento energético de los residuos	31
3.1	Productos del AER.....	31
3.1.1	Electricidad	32
3.1.2	Calor	32
3.1.3	Combustible.....	32
3.2	Tecnologías de AER	33
3.2.1	Métodos de conversión térmica	34
3.2.2	Conversión bioquímica.....	37
3.2.3	Depósito en vertedero con captura de gas.....	39
4	La implicación de las organizaciones internacionales en el AER.....	41
4.1	Los objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas.....	41
4.2	El AER en la Unión Europea	42
4.2.1	Marco de trabajo	43
4.2.2	Ayudas financieras.....	47

4.2.3	Optimización de los procesos de AER	48
5	El AER en España	51
5.1	Marco legal	51
5.1.1	Estrategia Española de Economía Circular	51
5.1.2	Plan de Energías Renovables 2011-2020	52
5.1.3	Ley de Cambio Climático y Transición Energética	53
5.2	El AER en la Comunidad Valenciana	53
6	Análisis de la situación actual del AER en España	57
6.1	Estadísticas sobre gestión y tratamiento de RSU en España	57
6.1.1	RSU y su AER en función del material	57
6.1.2	Tratamiento de los RSU en España	58
6.1.3	Tratamiento de los RSU en la UE	59
6.1.4	Producción energética en España	60
6.1.5	Evolución de las emisiones de GEI en España	61
6.1.6	El AER en la Comunidad Valenciana	62
6.2	Repercusión medioambiental de las tecnologías de AER en España	62
6.2.1	Composición de las emisiones de GEI en España	62
6.2.2	Estimación de las emisiones de GEI por fuente	64
6.2.3	Relación entre generación eléctrica y emisiones de CO ₂	68
7	Conclusiones	73
8	Anexos	75
9	Referencias	85

Índice de figuras

Figura 1. Tipos de residuos en función de la actividad económica.....	20
Figura 2. Generación de residuos en la Unión Europea.....	21
Figura 3. Composición de los RSU en los países de la OCDE.....	23
Figura 4. La jerarquía de gestión de residuos	24
Figura 5. Economía lineal vs economía circular.	28
Figura 6: Esquema de los tres bloques de tecnologías de AER.....	33
Figura 7. Planta de incineración de RSU de Amager (Dinamarca).....	35
Figura 8. Planta de gasificación de Güssing (Austria).	37
Figura 9. Planta de producción de bioetanol de Wilton (Reino Unido).....	39
Figura 10. Recolección y tratamiento del gas de vertedero.....	40
Figura 11: Logotipo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU	41
Figura 12. Acuerdo de París.	46
Figura 13. Contenedores de separación selectiva de residuos en Eslovenia.	49
Figura 14. Gestión de residuos de la Comunidad Valenciana	54
Figura 15. RSU generados en la Comunidad Valenciana.	55
Figura 16: RSU generados en la Comunidad Valenciana vs España.....	56
Figura 17. Cantidad de residuos generados en España en 2012.....	57
Figura 18. Tratamiento de los RSU en España.....	58
Figura 19. RSU depositados en vertederos en España.....	59
Figura 20. Tratamiento de RSU en Europa	60
Figura 21. Origen de la energía eléctrica generada en España	61
Figura 22. Emisiones de GEI en España	61
Figura 23. GEI por tipo en España.....	63
Figura 24. Fuentes de producción de GEI en España.....	64
Figura 25. Fuentes de producción de GEI en EE.UU.	65
Figura 26. Tasas de emisión de dióxido de carbono por fuente en EE.UU.....	65
Figura 27. Tasas de emisión de metano por fuente en EE.UU.....	66

Figura 28. Tasas de emisión de óxido nitroso por fuente en EE.UU.	67
Figura 29. Tasas de emisión de gases fluorados por fuente en EE.UU	68

Índice de tablas

Tabla 1. Fuentes de RSU y su composición.	22
Tabla 2. Instalaciones de gestión de RSU en la Comunidad Valenciana.	55
Tabla 3. Comparación entre energía generada y emisiones de CO ₂	69
Tabla 4. Valor calorífico aproximado de los materiales más comunes de los RSU	70

1 Cuestiones generales

1.1 Introducción

Los residuos son un producto inevitable y gestionarlos de una manera sostenible es todo un reto para las actuales y futuras generaciones. Una de las opciones para abordar este problema ha consistido en fomentar opciones de tratamiento como el reciclaje o la reutilización. Sin embargo, sigue habiendo una gran cantidad de residuos que, debido a sus características, no pueden ser tratados mediante estos métodos y, como consecuencia, terminan en los vertederos. Dado que cada vez hay mayor consumo y, por tanto, mayor generación de residuos, esta situación resulta insostenible a largo plazo.

El aprovechamiento energético de los residuos, en cambio, resulta una opción atractiva para hacer frente a varias cuestiones: por un lado ayuda a disminuir el volumen de residuos y sus emisiones a la atmósfera, y por otro, contribuye a paliar la demanda energética actual. Además, la progresiva escasez de los combustibles fósiles, la dependencia energética de los países con escasos recursos energéticos así como la necesidad de reducir las emisiones de gases contaminantes hacen necesario impulsar nuevos sistemas de obtención de energía alternativos.

Existen muchos factores que influyen en la elección de la tecnología de aprovechamiento energético más adecuada y cada región deberá evaluar su contexto para aplicarlas. Se deben destinar los recursos económicos necesarios para la implantación de un nuevo modelo de gestión, donde la generación de energía a partir de los residuos conviva con el resto de combustibles tradicionales. Debido a que las políticas nacionales e internacionales en este ámbito no están completamente implantadas, todavía queda mucho camino para alcanzar un modelo de desarrollo económico sostenible. Por ello, resulta necesario realizar un estudio en el que se valoren las ventajas y desventajas de este método de obtención de energía.

La temática de este TFM conecta con la asignatura *Edificación Sostenible. Energías Renovables* del Máster en Gestión de la Edificación, en el marco de la aplicación de estrategias para realizar ciudades sostenibles y la comprensión de la problemática ambiental que generan los residuos.

1.2 Estado del arte

Existe gran variedad de información al respecto. En su mayoría, dicha información procede de dos grandes grupos, por un lado, artículos de investigación que abordan el tema desde la perspectiva tecnológica (publicaciones en revistas científicas, libros, etc.) o por otra parte, documentos elaborados por instituciones u otras organizaciones internacionales (comunicaciones, informes, etc.). A continuación se indican las fuentes más relevantes sobre este tema:

- Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy: Se trata de un informe redactado por el Servicio de Ciencia y Conocimiento de la Comisión Europea para dar apoyo científico a la elaboración de políticas europeas en materia de gestión de residuos. En ella se recogen datos sobre la producción de residuos en Europa así como una evaluación sobre la situación actual de las distintas tecnologías de aprovechamiento energético de residuos. Este y otros informes y comunicaciones de interés se pueden obtener desde la página web de la Comisión Europea.
- Página web de Eurostat: Eurostat es la Oficina Europea de Estadística. Se encarga de recopilar información estadística sobre los estados miembros de la Unión Europea. Por ejemplo, la relativa a la cantidad de residuos generados por tipo y su gestión. Esta información puede ser consultada desde su página web.
- Libro de la energía de España de 2016: Cada año, la Secretaría de Estado de Energía elabora un estudio sobre la evolución de España en el mercado de la energía, el cual incluye datos sobre las cantidades de energía producidas y consumidas, emisiones generadas, etc. El último libro publicado corresponde al balance realizado para el año 2016.
- Página web del Instituto Nacional de Estadística (INE): El INE es el organismo encargado a nivel nacional de gestionar operaciones estadísticas económicos, demográficos y sociales. En su página web hay información disponible, entre otros, sobre los residuos generados en España por comunidad autónoma y su gestión.
- Auditoría operativa sobre tratamiento y eliminación de residuos urbanos: Se trata de una auditoría llevada a cabo por el Síndic de Comptes en la que se analiza el tratamiento y la eliminación de los residuos sólidos urbanos en la Comunidad Valenciana. En el informe se desarrolla como está organizado el sistema de gestión de los residuos y la normativa autonómica relacionada.

- Waste-to-Energy: Informe elaborado por el World Energy Council, que se define como un foro global de ideas innovadoras que promueve “el suministro y la utilización sostenible de la energía en beneficio de todos los pueblos”. En él se analizan desde el punto de vista científico las técnicas de aprovechamiento energético de residuos y el impacto ambiental y social que producen.

1.3 Objetivos

El objetivo principal del trabajo consiste en la realización de un análisis de la situación de España en materia de gestión y aprovechamiento energético de los residuos, de acuerdo con la normativa de la Unión Europea, y en el marco de la transición hacia una economía circular.

En la consecución de este objetivo principal, se han cumplido los siguientes objetivos secundarios:

- Estudio general sobre el concepto de residuo sólido urbano y su papel dentro de la jerarquía de gestión de residuos y las economías sostenibles (economía circular y la economía baja en carbono).
- Estudio sobre las distintas tecnologías de aprovechamiento energético de los residuos y los productos que estos generan.
- Análisis de la implicación de los organismos internacionales (Naciones Unidas, Unión Europea) en el aprovechamiento energético de los residuos.
- Análisis del marco legal de España y la implicación de la Comunidad Valenciana en el aprovechamiento energético de los residuos.

1.4 Metodología

A continuación se describe la metodología llevada a cabo para la elaboración de este trabajo:

- En primer lugar, se ha realizado un **estudio bibliográfico** de las fuentes más relevantes sobre los residuos sólidos urbanos y las distintas tecnologías de aprovechamiento energético. Esto incluye la búsqueda de artículos de investigación, libros y noticias de prensa, entre otros.
- A continuación, se ha indagado en **el papel que tienen los residuos sólidos urbanos** en la consecución de un modelo de desarrollo económico sostenible. Para ello se han estudiado las distintas comunicaciones, planes, estrategias y normativas elaboradas por organizaciones y gobiernos a nivel nacional e

internacional (Comunidad Valenciana, España y Europa), en el marco de la implantación de las tecnologías de aprovechamiento energético de los residuos, la transición hacia una economía circular y la jerarquía de gestión de los residuos, entre otros.

- **Recopilación de información estadística nacional e internacional** sobre los residuos y su gestión: cantidades totales generadas, tipo de tratamiento, tipología, composición, etc. También sobre las emisiones de gases de efecto invernadero: su evolución y sus fuentes de procedencia principales.
- **Comunicación** con las distintas plantas de valorización de la provincia de Alicante para la realización de una comparativa con los datos que pudieran proporcionar. Estas empresas finalmente no atendieron a las peticiones (Sección 6.1.6), por lo que, finalmente se ha realizado un **análisis de la situación actual** del aprovechamiento energético de los residuos en España.
- **Valoración del potencial** de las técnicas de aprovechamiento energético de los residuos en comparación con el resto de métodos de obtención de energía tradicionales.
- Una vez desarrollados todos los puntos descritos en los apartados anteriores se procede a la **redacción de las conclusiones**.

2 Los residuos y su papel en la economía

Para entender bien los problemas que existen con los residuos, es fundamental tener en cuenta que estos, tal y como se conocen hoy en día, son una invención exclusivamente humana. En la naturaleza no hay residuos. Se trata de un **sistema regenerativo** en el que todos los desechos se convierten, de manera inevitable, en aportes útiles para otros componentes del sistema: así, un árbol caído se transforma en alimento para las termitas o en la madriguera de otros animales; una fruta en descomposición añade nutrientes al terreno que la rodea; y los restos de una cacería de leones se convierte en comida para los animales carroñeros. En cambio, los residuos generados por el hombre no tienen ninguna función útil en la naturaleza. Y, sin embargo, todos ellos se pueden aprovechar y reutilizar, potencialmente, de alguna manera.

El objetivo de esta sección es proporcionar una idea general del concepto de residuo, su clasificación y el tipo y prioridad de tratamiento que debe recibir para proteger el medio ambiente. Además, puesto que este trabajo estudia el aprovechamiento energético de los residuos, se introducen una serie de estrategias económicas recientes, basadas en los sistemas regenerativos, que ahondan en este aspecto.

2.1 Tipos de residuos

Se entiende por **residuo** toda aquella sustancia que se desecha después de su uso primario, que no tiene valor, que es defectuosa o que no tiene ningún uso. Existen muchos tipos de residuos, por lo que es posible clasificarlos en función de diversos criterios. De acuerdo con la bibliografía consultada, una clasificación general de los residuos es la siguiente [1], [2], [3], [4], [5]:

- **Residuos sólidos urbanos (RSU).** Comúnmente conocidos como basura, este grupo incluye todos aquellos residuos sólidos que se generan a nivel urbano o municipal, como consecuencia de las actividades domésticas y comerciales (Figura 1a). La Sección 2.2 ofrece una definición más detallada de este grupo de residuos que, en 2016, representaba en la Unión Europea un 9% del total generado (Figura 2).
- **Residuos industriales.** Son aquellos residuos que se producen en la actividad industrial: procesos de fabricación y producción, generación de energía, minería y canteras, aguas residuales, construcción y el sector terciario (servicios). Dentro de esta categoría se incluyen materiales como metales, ladrillos, cenizas o productos

químicos, por mencionar los más relevantes (Figura 1b). Estos residuos representaban cerca del 90% del total en la UE en 2016 (Figura 2).

- **Residuos agrarios.** Se incluyen todos aquellos residuos naturales que se derivan de las actividades ganaderas (como la cría de ganado, las explotaciones agrícolas, la horticultura, etc.), las actividades forestales y la pesca (Figura 1c). Estos residuos, que algunos autores incluyen como parte de los industriales [5], son generalmente biodegradables y representaban un 1% del total en la UE en 2016 (Figura 2).
- **Residuos biomédicos.** Este tipo de residuos clínicos se genera durante el diagnóstico y tratamiento de personas y animales, así como durante las actividades de investigación y gestión de sustancias biológicas. En esta categoría se incluyen residuos desechables, objetos punzantes o fluidos de origen corporal, entre otros (Figura 1d). Por ello, estos residuos pueden resultar peligrosos si no se gestionan de la manera adecuada.
- **Residuos tóxicos.** Son aquellos residuos que, por contener sustancias nocivas para las personas y el medio ambiente, se consideran peligrosos. Dentro de esta categoría se engloban todos aquellos residuos corrosivos, inflamables, explosivos o radioactivos (Figura 1f), incluyendo la conocida como *chatarra electrónica*, esto es, los residuos eléctricos y electrónicos (Figura 1e).

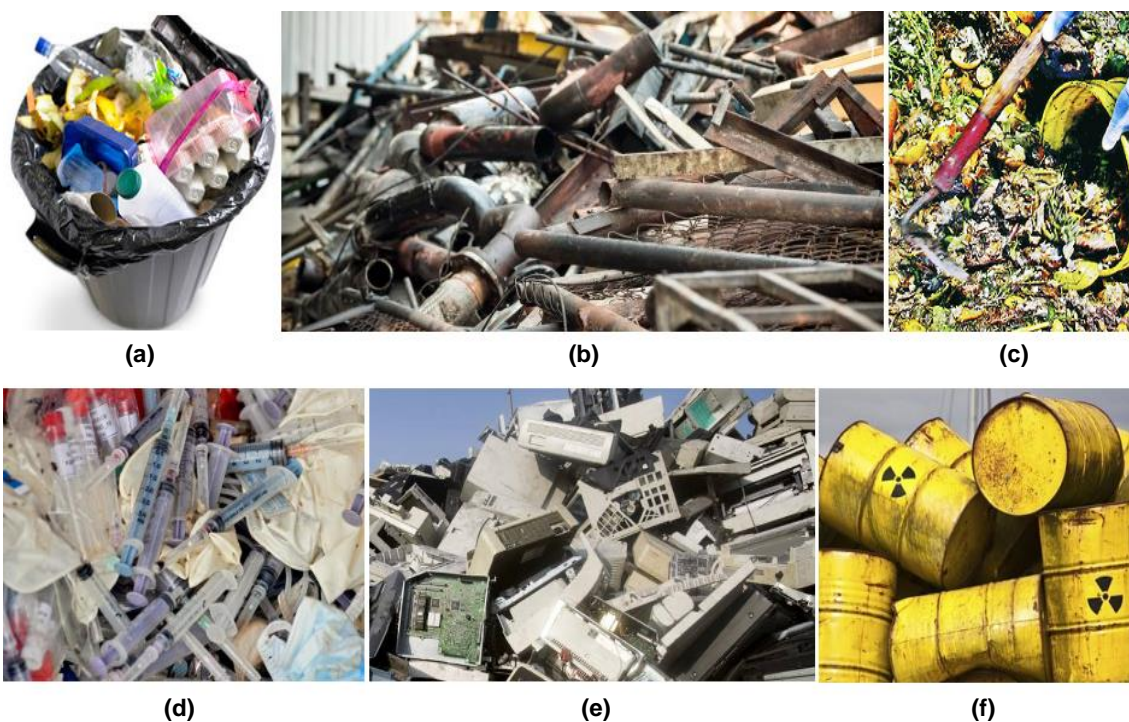


Figura 1. Tipos de residuos en función de la actividad económica: (a) residuos sólidos urbanos, (b) residuos industriales, (c) residuos agrarios, (d) residuos biomédicos, (e) chatarra electrónica y (f)

residuos radioactivos. Imágenes adaptadas de [tinyurl.com/y7mjuhgc],[tinyurl.com/ybxeles3],[tinyurl.com/y73kfq7d],[tinyurl.com/y9y5pdt9],[tinyurl.com/y9f5ae33],[tinyurl.com/ydh6tr8n]

Al considerar los residuos como un recurso energético, es importante tener en cuenta la composición de los diferentes tipos de residuos disponibles. Los residuos sólidos urbanos procedentes de fuentes municipales son el flujo de residuos más común utilizado para la recuperación de energía y en los que se centra el presente trabajo (véase la sección 2.2). Sin embargo, los residuos de la construcción, los biorresiduos de las actividades agrícolas y forestales, los residuos peligrosos y muchos otros también pueden considerarse viables para la recuperación de energía, dependiendo de su composición específica, su contenido energético y las necesidades específicas de la sociedad en términos de eliminación de residuos [6].

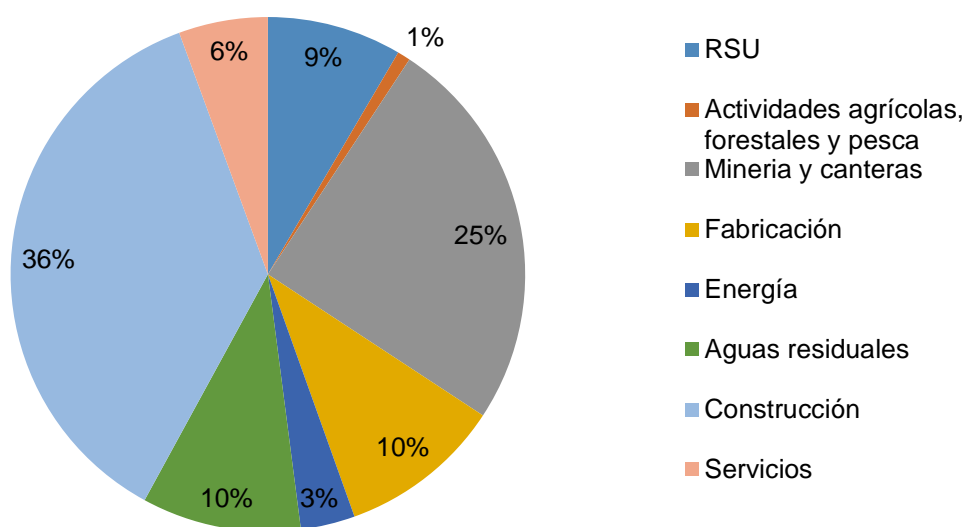


Figura 2. Generación de residuos por actividades económicas y domésticas en la Unión Europea (2016). Porcentajes sobre un total de 2.535 millones de toneladas. Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por Eurostat (véase Anexo A) [7].

Otro criterio usado para clasificar los residuos es su **estado físico** [8]:

- **Residuos sólidos.** Constituyen para la sociedad la referencia de lo que se considera un residuo, como por ejemplo el papel y el cartón, el vidrio, el plástico, la madera, etc.
- **Residuos líquidos.** Reciben el nombre de **vertidos** y entre ellos se encuentran las aguas procedentes de las depuradoras, los residuos químicos o los aceites usados, por mencionar algunos.

- **Residuos gaseosos.** Reciben el nombre de **emisiones** y se producen durante los procesos de conversión química de la industria. Algunas emisiones pueden ser contaminantes para la atmósfera.

2.2 Los residuos sólidos urbanos

Los **Residuos Sólidos Urbanos (RSU)** se clasifican y definen de varias maneras dependiendo del país y de las prácticas de gestión de residuos que se empleen. Por ejemplo, la Oficina Europea de Estadística (Eurostat) identifica los RSU como los residuos producidos por los hogares o por otras fuentes como el comercio, las oficinas y las instituciones públicas y que son recogidos por las autoridades locales (o en su nombre) y eliminados a través del sistema de gestión de residuos [9]. Puesto que las diferencias en las definiciones de RSU crean incertidumbre a la hora de evaluar la gestión de los residuos e incoherencias en la recogida de datos, en este trabajo se ha decidido seguir el criterio establecido por Eurostat.

La Tabla 1 muestra las diferentes fuentes de RSU y sus respectivas composiciones. Los principales componentes de los residuos sólidos son el papel, la materia orgánica, los plásticos, el vidrio, el metal y los textiles.

Fuente de RSU	Composición
Residencial	Residuos de alimentos, papel, cartón, plásticos, textiles, cuero, residuos de jardín, madera, vidrio, metales, cenizas, residuos especiales (por ejemplo, artículos voluminosos, electrónica de consumo, electrodomésticos, baterías, aceite, neumáticos), residuos domésticos peligrosos y residuos electrónicos.
Comercial e institucional	Papel, cartón, plásticos, madera, residuos de alimentos, vidrio, metales, residuos especiales, residuos peligrosos, residuos electrónicos.
Servicios municipales	Residuos de limpieza de las calles, recortes de paisajes y árboles, lodos, residuos de áreas recreativas.

Tabla 1. Fuentes de RSU y su composición [6].

La Figura 3 ilustra la composición de los residuos sólidos en los países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Como se puede ver, la mayoría de los residuos (cerca de un tercio) corresponden al papel y el

cartón, lo que contrasta con el hecho de que, a nivel mundial, casi la mitad de los residuos producidos son orgánicos [6].

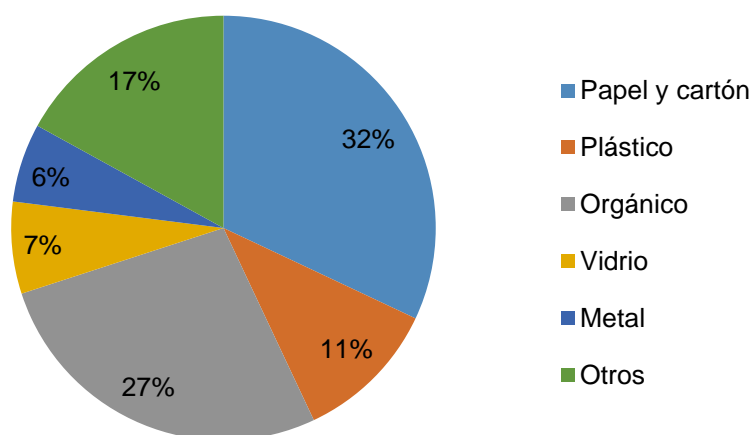


Figura 3. Composición de los RSU en los países de la OCDE (2006-2007). Elaboración propia a partir de los datos proporcionados en [10].

El crecimiento de la población o un índice de desarrollo humano elevado son factores que propician el aumento de la cantidad de RSU generado en una región. Aunque, como se ha visto en la Figura 3, los RSU representan menos de un 10% de la cantidad total de residuos generados, suponen un problema difícil de gestionar debido a su variada composición [11], [12]. Una gestión inadecuada de los residuos implica unos efectos negativos para el medio ambiente. Por ejemplo, los gases que, como el metano, se producen en los vertederos durante las actividades de tratamiento de los residuos contribuyen al efecto invernadero y, en consecuencia, al incremento de la temperatura superficial media. Además, la acumulación e incineración posteriores de estos residuos en los vertederos producen una contaminación cuyo impacto amenaza el medio ambiente y la calidad de vida [12], [13]. Una gestión adecuada de los residuos pasa por extraer el máximo beneficio práctico de los productos y generar la mínima cantidad de residuos. La **jerarquía de gestión de residuos**, que se describe en la Sección 2.3, aborda este modelo de gestión. Algunos autores [14] consideran que esta jerarquía es una herramienta esencial para garantizar la transición hacia una **economía circular** (en contraste con la economía lineal basada en el modelo de *usar y tirar*). La Sección 2.4.1 trata sobre este nuevo modelo económico.

De forma paralela, la mejora de las condiciones de vida supone un aumento de la demanda energética. Con el objetivo de reducir el impacto ambiental ocasionado por los métodos de producción de energía tradicionales, el desarrollo tecnológico se ha encaminado durante los últimos años hacia otros métodos de obtención de energía

más eficientes, intentando reducir durante el proceso el volumen de residuos existentes. De hecho, un porcentaje muy elevado de la producción de energía a escala mundial (en torno al 80%) se produce de manera contaminante mediante la combustión o la gasificación. Por esta razón, aquellos países con mayor dependencia energética deben perseguir la implantación de infraestructuras de generación de energía a partir de los residuos. Mediante esta actividad, que recibe el nombre de **aprovechamiento energético de los residuos (AER)**, es posible reducir la cantidad de RSU en un 90% durante el proceso [12] [15].

Las plantas de conversión de residuos en energía son, fundamentalmente, plantas que utilizan los RSU en lugar del combustible tradicional. Las principales infraestructuras de conversión de residuos en energía se han implantado en Europa, América del Norte y Asia. Debido a la alta densidad de población y a la escasez de terreno para enterrar los residuos, la mayoría de estas plantas de conversión se encuentran en Europa occidental [15]. La Sección 3.2 se centra en la descripción y análisis de las tecnologías de AER más relevantes en la actualidad.

2.3 La jerarquía de gestión de residuos

La jerarquía de gestión de residuos es un conjunto de prioridades para el uso eficiente de los recursos que clasifica las opciones de gestión de residuos en función de lo que es mejor para el medio ambiente. En primer lugar, da la máxima prioridad a la prevención de los residuos. Cuando se crean residuos, se da prioridad a su preparación para la reutilización, luego el reciclado, luego la recuperación energética y, por último, la eliminación (por ejemplo, en vertederos) [15], [2]. Se suele representar en forma de pirámide invertida para resaltar que los escalones más cercanos a la base son los más prioritarios y los más cercanos al vértice, los que menos (Figura 4).



Figura 4. La jerarquía de gestión de residuos. Elaboración propia.

2.3.1 Descripción de las prioridades

A continuación, se describen las cinco prioridades que componen la pirámide de la jerarquía de gestión de residuos.

2.3.1.1 Prevención

Se trata de la medida con mayor prioridad. En efecto, se pueden evitar los problemas medioambientales derivados de los residuos si dichos residuos no existen. Llevar a cabo esta tarea resulta complicado ya que se trata de una responsabilidad social que afecta tanto a consumidores como a productores. Para ello, resulta necesario adoptar medidas tales como la concienciación, la reducción de la cantidad de materiales empleados en el diseño y fabricación de los productos, la prolongación de la vida útil de los mismos o la reducción del empleo de materiales peligrosos en los procesos industriales [4]. Por ejemplo, a nivel del consumidor, se puede evitar que las bolsas de plástico vayan al vertedero utilizando bolsas de larga duración, como las bolsas de lona. A nivel industrial, el campo de la química verde (o sostenible) se centra en el diseño de productos y procesos que minimizan el uso y generación de sustancias peligrosas.

2.3.1.2 Preparación para la reutilización

Esta medida consiste en revisar los residuos con el objetivo de conservar aquellas partes o componentes que todavía se puedan reutilizar. Mediante esta práctica se reduce el consumo y disminuye la cantidad de residuos generados [4]. Las bolsas de plástico son, de nuevo, el ejemplo más obvio. Otra extensión de la idea de reutilización es el rellenado. Las botellas de vidrio se pueden recoger, lavar, rellenar y poner a disposición de los consumidores muchas veces a lo largo de su vida útil.

2.3.1.3 Reciclaje

El reciclaje consiste en el aprovechamiento del material de los residuos para la fabricación de productos nuevos. Es la opción preferida cuando la reutilización no es una opción o si un artículo está roto o en malas condiciones. Se trata de una actividad que no se debe dejar de fomentar debido a las numerosas ventajas que supone. El reciclaje contrasta con la reutilización en el hecho de que el reciclaje tiende a descomponer un artículo en sus materias primas antes de transformarlo en otra cosa. En el ejemplo de las botellas de vidrio, la reutilización implica lavar y rellenar, mientras que el reciclaje implicaría moler el vidrio y fundirlo de nuevo.

El reciclaje ahorra en el procesamiento o la extracción de materias primas, por lo que es útil cuando los materiales son limitados y la reutilización es difícil. Por ejemplo, el reciclaje de latas de aluminio utiliza menos del 5% de la energía utilizada en la purificación del metal de aluminio a partir de la bauxita [16], lo que requiere realizar una electrólisis de elevado gasto energético. Al eliminar este paso en el proceso de reciclaje, el metal sólo necesita ser fundido para que pueda ser reutilizado de cualquier manera. Esto lo convierte en uno de los pocos procesos de reciclaje que no solo demuestra ser muy eficiente, sino que también puede generar beneficios.

Sin embargo, el reciclaje presenta numerosos inconvenientes. Si el proceso de reciclaje consume más energía o recursos materiales, entonces no es particularmente viable y deben considerarse otras opciones de la jerarquía [4].

2.3.1.4 Recuperación energética

Cuando un residuo no se puede evitar, ni reutilizar, ni reciclar, la jerarquía de gestión de residuos da prioridad a su recuperación energética por encima de su traslado al vertedero [15]. La recuperación energética consiste en la conversión de materiales de desecho que no se pueden reciclar en calor, electricidad o combustible para su aprovechamiento a través de diversos procesos, entre los que se incluyen la combustión, la gasificación, la pirólisis, la digestión anaeróbica y la recuperación de gases de vertedero. Este proceso a menudo se denomina **aprovechamiento energético de los residuos (AER)** (véase la Sección 3). La conversión de residuos no reciclables en electricidad y calor genera una fuente de energía renovable y reduce las emisiones de carbono al compensar la necesidad de energía de fuentes fósiles y reducir la generación de metano de los vertederos. Una vez recuperada la energía, una pequeña parte del volumen permanece como ceniza, que generalmente se envía al vertedero [13], [17], [18].

2.3.1.5 Eliminación

Dentro de la jerarquía de gestión, la eliminación de los residuos se establece como el método de último recurso y el menos favorecido en términos de reducción de residuos. Los vertederos son la forma más común de eliminación de residuos y son un componente importante del sistema de gestión de residuos. Los vertederos modernos son instalaciones cuidadosamente diseñadas, distribuidas, gestionadas y evaluadas para asegurar el cumplimiento de las regulaciones vigentes. Una vez que los residuos llegan al vertedero, se degradan de forma natural, aunque esto puede llevar miles de años. Sin embargo, se liberan emisiones de gases de efecto invernadero, producidos

por la descomposición de los residuos. En algunos vertederos (véase la Sección 3.2.3) se trabaja hacia una recuperación energética mediante la captación de una parte de estas emisiones, como el gas metano, que puede usarse como combustible para la generación de electricidad. Cuando un vertedero termina su vida activa, el terreno se puede reutilizar como lugar de ocio en forma de parques o campos de golf [15].

2.3.2 Observaciones

Se observa que esta jerarquía no propone como opción prioritaria la recuperación energética, sino que prioriza la prevención, la reutilización y el reciclaje por encima de esta. Con el establecimiento de esta jerarquía de gestión, se garantiza que los residuos sean sometidos al proceso más adecuado, de manera que ninguna actividad desincentive a otra más favorable para el entorno. Es decir, lo que se pretende a través de este conjunto de prioridades es que las actividades se complementen entre sí y no que compitan entre ellas; que se pueda dar el caso de que en una ciudad se obtenga energía a partir de los residuos sin que por ello deje de existir un alto nivel de reciclaje. Las opciones disponibles de gestión de los residuos no son incompatibles entre sí, sino que pueden coexistir [17], [18], [2]. Además, la jerarquía de residuos no es inflexible. Sólo cuando sea posible demostrar que, llevando a cabo una opción de tratamiento inferior sobre los residuos, el resultado va a ser mejor para el medio ambiente, sería posible no cumplir el orden propuesto por la jerarquía [17].

Además, dado que la infraestructura de gestión de residuos tiene en las ciudades un papel muy importante a largo plazo, resulta necesario garantizar que dicho sistema sea flexible y adaptable a los cambios que puedan darse en los próximos años. Se espera que, con el paso del tiempo, las opciones de gestión de residuos de la jerarquía más prioritarias serán las que predominen [17]. Por lo tanto, la recuperación de energía a partir de los RSU supone una mejora para los beneficios medioambientales en comparación con su eliminación en los vertederos. Sin embargo, en la actualidad no se aprovecha todo el potencial de los residuos, ya que muchos de ellos terminan en los vertederos sin ser la opción más favorable de tratamiento de estos. [18]

2.4 Economías sostenibles

En esta sección se describen dos modelos económicos que tienen como fin reducir la contaminación medioambiental producida por los residuos y que se apoyan

en la jerarquía de gestión de los residuos. Estos dos modelos económicos son la economía circular (Sección 2.4.1) y la economía baja en carbono (Sección 2.4.2).

2.4.1 La economía circular

La economía circular es un modelo regenerativo en el que el consumo de recursos, los residuos, las emisiones y las pérdidas energéticas se reducen al mínimo, a través del diseño, el mantenimiento, la reutilización y el reciclaje. Se basa en dar el máximo valor productivo posible a los recursos. Es el concepto opuesto al modelo de economía lineal, en el que las materias primas son utilizadas para la fabricación de productos, y una vez usados se tiran sin darle otro aprovechamiento (Figura 5).

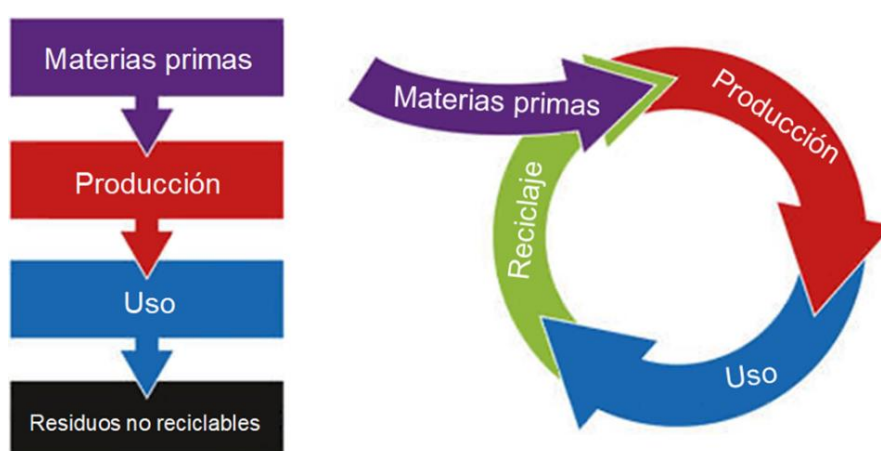


Figura 5. A la izquierda, esquema de la economía lineal; a la derecha, esquema de la economía circular. Imagen adaptada de tinyurl.com/yb3wj8ms.

La transición hacia un modelo económico eficiente en el uso de los recursos, como es la economía circular, aporta beneficios medioambientales, ahorro de costes a productores y consumidores y también beneficios sociales. Las industrias circulares están bien posicionadas para crear puestos de trabajo en ocupaciones y regiones con tasas de desempleo persistentemente altas y para contribuir a reducir el desempleo estructural. Se espera que la economía circular proporcione un gran número de puestos de trabajo en la refabricación de productos, la reparación y el reciclaje [19].

El concepto de economía circular ha cobrado importancia durante los últimos años en diferentes sectores, como por ejemplo el de la investigación. Una de las partes menos desarrolladas, pero potencialmente importantes de la futura economía circular es la bioeconomía, que estudia cómo captar energía o crear nuevos productos a partir los residuos biológicos como, por ejemplo, los residuos agrícolas, para crear biogás o bioplásticos. También en la industria, las empresas son cada vez más conscientes del gran valor que supone la economía circular debido a las oportunidades de trabajo que

ofrece su aplicación. Recientemente, también ha tomado un papel importante en la formulación de políticas; ha influenciado en los gobiernos y organizaciones estatales a nivel nacional e internacional. En este sentido, Alemania fue el primer país en incorporar la Economía Circular en su legislación nacional mediante la aprobación de la *Ley de ciclo cerrado de sustancias y gestión de residuos*, en 1996. A esta iniciativa se sumó Japón en 2002 con la *Ley básica para el establecimiento de una sociedad basada en el reciclaje*. Ya en 2015, la Comisión Europea promulgó el *Plan de acción para la economía circular* (véase la Sección 4.2.1.1), siendo la primera vez que un organismo supranacional elabora medidas en este ámbito [20], [21], [22], [19].

En las Secciones 4.2.1 y 5.1.1 se enumeran las políticas que, a nivel internacional y nacional, se han propuesto para fomentar la transición hacia la economía circular.

2.4.2 La economía baja en carbono

Una **economía baja en carbono**, también conocida como **economía descarbonizada**, es aquella que propone la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles como fuentes de energía. Este modelo pretende que la producción de gases de efecto invernadero sea mínima, así como aminorar las consecuencias potencialmente negativas del cambio climático. Garantizar la transición hacia la descarbonización de la economía requiere la innovación y el desarrollo de estrategias sociales, económicas y ambientales. En este sentido, el sector de la energía tiene un importante papel para contribuir a este objetivo: según la Comisión Europea, para el año 2050 sería posible eliminar prácticamente el total de las emisiones de CO₂ si se sustituyeran las energías procedentes de los combustibles fósiles por otras renovables [23], [24].

Los residuos y su gestión también son clave en este proceso. Las tres actividades con mayor prioridad de la jerarquía de los residuos (la prevención, la reutilización y el reciclaje) ayudan de manera considerable a disminuir estas emisiones. Por ejemplo, se estima que se produciría un ahorro de 500kg de CO₂ equivalente mediante el reciclaje de una tonelada de envases de plástico. En cuanto al sector de la industria, las empresas deben mantener su producción respetando los límites ecológicos impuestos. En el caso de aquellas industrias donde no sea posible reducir las emisiones, se aplicarán tecnologías para captar y almacenar el carbono producido [23], [24].

3 El aprovechamiento energético de los residuos

Las tecnologías de **aprovechamiento energético de los residuos (AER)** son todos aquellos procesos que tienen por objetivo captar la energía procedente de los residuos y convertirlos en energía utilizable. Esto incluye su conversión a electricidad, calefacción y combustibles (Sección 3.1). Esta conversión puede llevarse a cabo mediante diversas técnicas, que se detallan en la Sección 3.2.

En Europa, la gestión de los residuos ha dependido en gran parte de los vertederos. Con las primeras plantas de incineración, los residuos se quemaban únicamente para reducir su volumen. Sin embargo, durante los últimos años, las nuevas políticas europeas en materia de gestión de residuos han fomentado la construcción de plantas de tratamiento de residuos destinadas a la captación de su energía. Para ello es necesario que los residuos presenten las cualidades adecuadas. Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE) es necesario que una tonelada de RSU tenga un poder calorífico (la cantidad de energía desprendida al quemarse) de entre 8 y 12 MJ/kg¹ para poder producir una energía lo suficientemente efectiva [12], [17].

Por otra parte, un estudio llevado a cabo entre el Centro de Ingeniería de la Tierra y el Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA, determinó que entre los años 2000 y 2007, la capacidad mundial de generación de residuos había aumentado en 4 millones de toneladas por año durante ese periodo. Esa tasa de crecimiento resulta insostenible a largo plazo, ya que cuanto mayores sean la población y el consumo mayor será la producción de residuos. Una manera de disminuir eficazmente el volumen de residuos de los vertederos consiste en incrementar la capacidad de recuperación energética de residuos a escala mundial [15].

El hecho de disponer de varias tecnologías para la conversión de residuos a energía, hace necesaria una reflexión acerca de las ventajas y desventajas que proporcionan con respecto a las formas de obtención de energía tradicionales [15].

3.1 Productos del AER

Como resultado de la conversión energética de los RSU, se obtienen principalmente tres productos: electricidad, calor y combustible.

¹ De 8 a 12 megajulios (MJ) es la energía eléctrica media requerida para cargar un teléfono móvil durante un año.

3.1.1 Electricidad

La electricidad se puede producir a partir de los residuos mediante combustión directa, y el calor liberado se utiliza para producir vapor que impulsa una turbina. La eficiencia eléctrica de la incineración (Sección 3.2.1.1) suele ser mayor que el de la gasificación (Sección 3.2.1.3). Los procesos de gasificación y pirolisis (3.2.1.2) producen un gas combustible sintético, que puede utilizarse para producir electricidad a través del proceso presentado anteriormente o refinarse para su generación directa en una turbina o motor de gas. Se obtiene una eficiencia mayor con la combustión directa en turbinas de gas o motores que en una turbina de vapor [17], [6].

3.1.2 Calor

El método convencional para generar calor a partir de los residuos es la producción de vapor, que se puede conseguir o bien mediante combustión o bien mediante el uso de *gas de síntesis* (un gas obtenido a partir de sustancias ricas en carbono, véase la Sección 3.2.1.3) en un sistema de calderas. Para que este proceso sea comercialmente viable, es esencial encontrar clientes a largo plazo que aprovechen el calor producido y que permitan financiar los costes de la infraestructura [17], [6].

En este punto cabe destacar que las plantas de AER pueden producir calor y electricidad simultáneamente utilizando una unidad de cogeneración. En este contexto, el calor que se genera durante la producción de electricidad se captura y se utiliza. Una demanda constante de calor producirá los mayores beneficios económicos, y depende de la ubicación de la planta y de la posibilidad de transferir el calor a otros emplazamientos. El reto de operar los sistemas de cogeneración de forma óptima consiste en conocer el valor relativo de la electricidad y el calor para priorizar lo que debería producirse más en función de la demanda. Esto sucede porque existe un equilibrio entre el calor y la electricidad, lo que significa que a medida que se produce más calor, la producción de electricidad disminuirá debido a la menor cantidad de energía disponible [17], [6].

3.1.3 Combustible

Los procesos de AER también pueden generar combustible. El gas de síntesis producido por las tecnologías AER de gasificación y pirólisis puede consumirse en los motores de los vehículos si se convierte en biometano. El gas de síntesis también se puede utilizar para fabricar diésel sintético y combustible de aviación. Otros

combustibles incluyen hidrógeno, etanol y biodiesel. El aceite puede producirse mediante pirólisis, que requiere un tratamiento adicional para convertirse en gasolina o gasóleo [17], [6].

3.2 Tecnologías de AER

Existen tres tipos fundamentales de tecnologías de AER: (1) los métodos de conversión térmica, que incluyen la incineración, la pirólisis y la gasificación; (2) la conversión bioquímica, que incluye la digestión anaeróbica y la fermentación; y (3) el depósito en vertederos con captura de gases [12]. La Figura 6 muestra el esquema de las tecnologías de AER y las secciones en las que se describen. En el Anexo M se puede consultar una tabla con las ventajas e inconvenientes de cada uno de los grandes grupos de tecnologías de AER.

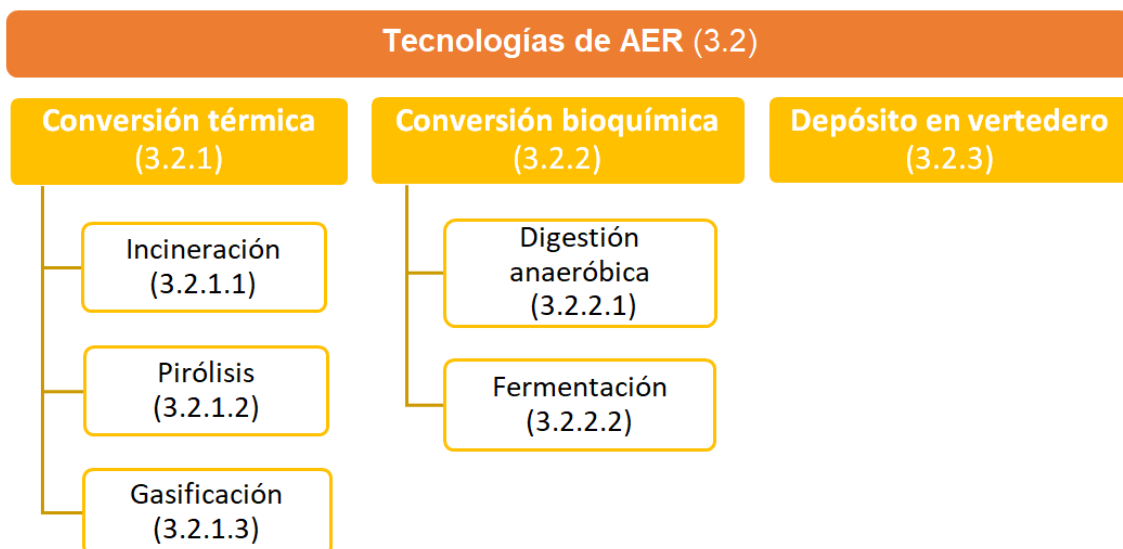


Figura 6: Esquema de los tres bloques de tecnologías de AER. Elaboración propia.

Desde la perspectiva de la tecnología energética, los residuos pueden clasificarse en dos tipos: residuos húmedos y residuos secos. Los residuos húmedos, como por ejemplo los restos de alimentos o el estiércol se tratan mediante procesos biológicos como son la digestión anaeróbica, en la que se produce gas metano, y la fermentación, en la que se produce etanol, siendo ambos gases portadores de energía. Por lo que respecta a los residuos secos, como por ejemplo los plásticos que no se pueden reciclar o los residuos agrícolas como los rastrojos, se tratan mediante procesos térmicos como la incineración, la gasificación y la pirólisis [13].

Debido a la existencia de una gran variedad de tipos de residuos y a la diversidad de las características que estos poseen, es importante garantizar que la tecnología

seleccionada sea realmente adecuada y compatible al tipo de residuo al que se va a aplicar. De hecho, una de las mayores causas de fracaso en estos procesos de conversión de residuos a energía se debe a que el sistema aplicado no se adapta a las características del residuo. También es importante tener en cuenta aspectos como la cantidad de energía que el tipo de residuo puede aportar y factores como el contenido de humedad, la presencia de azufre o de otros compuestos que pueden contribuir a la contaminación medioambiental, así como la forma, tamaño y otras propiedades del material [13].

3.2.1 Métodos de conversión térmica

Se consideran métodos de conversión térmica aquellos sistemas de aprovechamiento energético de los residuos en los que estos se someten a procedimientos a altas temperaturas. Se trata del principal grupo de tecnologías de AER que se aplica a los RSU. Los métodos que componen este grupo son la incineración, la pirólisis y la gasificación.

3.2.1.1 Incineración

La incineración es el método de conversión térmica más utilizado y consiste en la oxidación completa de los materiales combustibles contenidos en los RSU en una cámara de combustión a altas temperaturas (entre los 750 y 1000 °C). Con este proceso se reduce aproximadamente un 90% del volumen total de los residuos.

El proceso consiste en primer lugar, en la recepción en la planta de los RSU. Los residuos, que llegan en un conjunto heterogéneo, se clasifican en función de sus características: tamaño, composición, material, etc. A continuación, se procede a su incineración y recuperación energética. Durante la combustión, se producen simultáneamente varios procesos complejos. Inicialmente, el calor en la cámara de combustión evapora la humedad contenida en los residuos sólidos y volatiliza sus componentes. El proceso conduce a la conversión de los residuos en gas de combustión, cenizas y calor. El calor liberado se utiliza para producir vapor, que se envía a una turbina para producir electricidad. Dependiendo del tratamiento que se quiera dar a las cenizas, se pueden recuperar de estas diferentes metales y las cenizas restantes pueden emplearse en la construcción como aditivo del hormigón [6].

En el pasado, estos sistemas de incineración emitían a la atmósfera gases de efecto invernadero, como el CO₂. Actualmente este problema ha mejorado debido al avance tecnológico y al desarrollo de normativas de obligado cumplimiento como la directriz

2000/76/EC, en la que se determinan las cantidades máximas de emisión de gases a la atmósfera para este tipo de instalaciones. La naturaleza de los gases producidos durante el proceso de incineración depende tanto de las características del residuo como del tratamiento previo que reciban. Sin embargo, estas emisiones continúan siendo notablemente inferiores a las que producen los combustibles fósiles tradicionales como el petróleo o el gas natural. La producción energética a partir de RSU en plantas de incineración se considera como uno de los sistemas más eficientes de gestión de residuos.

Por otra parte, la creación de instalaciones de incineración de RSU requiere de una inversión muy elevada. Una planta mediana, con capacidad para incinerar 150.000 toneladas de residuos al año necesita una inversión aproximada de 80 millones de euros. En el anexo B se adjunta una tabla con el número de instalaciones de incineración existentes en Europa y la cantidad de toneladas de RSU tratadas en el año 2016 en millones de toneladas. [13], [12], [25].

Un ejemplo de este tipo de planta se encuentra en la isla danesa de Amager. Se trata de una central de incineración de RSU inaugurada en 2017 en la que los residuos son utilizados como combustible para la obtención de electricidad y calor. Tiene capacidad para procesar 400.000 toneladas de residuos al año, logrando reducir las emisiones de CO₂ en 60.000 toneladas en el mismo periodo de tiempo. Las cenizas y el resto de materias primas obtenidas durante la incineración se utilizan en construcción [26], [27].



Figura 7. Planta de incineración de RSU de Amager (Dinamarca). La cubierta se utiliza como pista de esquí. Imagen obtenida de [tinyurl.com/y94w8ej5]

3.2.1.2 Pirólisis

La pirolisis es un método de tratamiento térmico de residuos que tiene como objetivo su descomposición a altas temperaturas (entre los 400 y 900 °C), sin combustión, en un entorno libre de oxígeno.

El proceso consiste, en primer lugar, en triturar los residuos para homogeneizar la mezcla y procesarlos para mejorar su poder calorífico durante la reacción. Como resultado de este proceso se obtienen sustancias en estado gaseoso (**gas de síntesis**) y líquido (**alquitrán**), además de cenizas sólidas (**coque**). En función de la temperatura, el tiempo de exposición y las características de los residuos, las cantidades que se obtienen de cada una de estas materias varía. Si los residuos son sometidos a temperaturas elevadas durante un corto periodo de tiempo el producto obtenido es mayoritariamente líquido. En cambio, durante tiempos de exposición superiores a temperaturas moderadas se obtiene mayor cantidad de ceniza.

Además de la producción energética, mediante la pirólisis es posible obtener otros productos, como el biocarbón, el bioaceite y otros gases combustibles. Debido a que esta tecnología de AER ha sido objeto de gran interés durante los últimos años, existe una gran variedad de métodos en desarrollo. Un ejemplo de ellos se centra en la conversión de residuos húmedos procedentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales [13], [28], [12], [25], [6].

3.2.1.3 Gasificación

La gasificación consiste en la transformación de materias primas que contienen carbono, como los RSU orgánicos, en dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y agua (H_2O). Para que se produzca esta reacción, es necesario someter los residuos a temperaturas superiores a los 700 °C y sin combustión, pero, a diferencia de la pirolisis, se realiza con la presencia de una cantidad controlada de oxígeno o vapor [6].

Durante el proceso de gasificación se producen también otros gases, como el metano, y pequeñas partículas de carbón, alquitranes y cenizas [15]. El gas producido, que se denomina **gas de síntesis**, se puede utilizar para diversas aplicaciones después de pasar por un proceso de purificación, que es el mayor reto para comercializar esta planta a gran escala. Una vez purificado, el gas de síntesis se puede utilizar para generar combustibles de alta calidad, químicos o gas natural sintético [6].

A pesar de que la gasificación es un sistema muy eficaz para obtener energía, la naturaleza heterogénea de los RSU hace que el proceso de gasificación sea muy complejo. Esto, unido con los retos que supone la purificación del gas de síntesis, lleva a que no existan muchas plantas de gasificación de residuos a gran escala en Europa [6]. La inversión inicial necesaria para la implantación de una instalación de este tipo es, por lo tanto, muy elevada. A modo ilustrativo, un proyecto para el establecimiento de una planta de gasificación en Valencia se estimó con un presupuesto de 2,2 millones de euros [29].

Un ejemplo de planta de gasificación se encuentra en el municipio austriaco de Güssing (Figura 8). Esta planta de 8 MW utiliza los residuos forestales como combustible y, al contrario que los combustibles fósiles, genera energía sin contribuir a la emisión de CO₂. Esta planta se estableció como parte un plan municipal de energía renovable que convirtió a la ciudad en la primera de la Unión Europea en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en más de un 90% [13], [28], [25].



Figura 8. Planta de gasificación de Güssing (Austria). Imagen obtenida de [tinyurl.com/yad589mo]

3.2.2 Conversión bioquímica

Este grupo de tecnologías de AER utiliza procesos microbianos (reacciones enzimáticas) para transformar los residuos y se limita a los residuos biodegradables, como los residuos de alimentos y de jardín. La conversión bioquímica se divide en dos subgrupos: la digestión anaeróbica y la fermentación. Estas dos tecnologías de AER solo se pueden llevar a cabo de forma eficiente si se conoce la composición de los residuos orgánicos, por lo que es necesario realizar una separación previa en función de sus características [12], [30], [31].

3.2.2.1 Digestión anaeróbica

Se trata de un proceso por el cual una serie de microorganismos descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo **biogás** (un gas rico en metano que se utiliza como combustible), y **digestato** (una fuente de nutrientes que se utiliza como fertilizante).

El tiempo que tardan los residuos orgánicos en procesarse dentro de una planta de digestión anaeróbica suele ser de 15 a 30 días. Por un lado, el biogás se utiliza para generar energía renovable en forma de electricidad o calor. Por otro lado, el digestato se puede usar como fertilizante dos veces al año en tierras de cultivo, sustituyendo de manera eficaz a los fertilizantes derivados de los combustibles fósiles. Esta tecnología se utiliza mucho para el tratamiento de aguas residuales y también para el tratamiento de residuos orgánicos procedentes de alimentos. En este sentido, la materia prima suele necesitar un pretratamiento. Por ejemplo, los residuos alimenticios de los supermercados requieren la eliminación de todos los envases; mientras que los residuos agrícolas, deben homogeneizarse para alcanzar la consistencia adecuada.

Existen muchos tipos de sistemas de digestión anaeróbica que operan de diferentes formas. Estos sistemas se suelen clasificar según su temperatura (que no sobrepasa los 60 °C), el grado de humedad, el tipo de microorganismos que intervienen en la digestión, el modo en que se procesa la materia prima, la verticalidad del tanque, etc. La elección de la tecnología de digestión anaeróbica dependerá de muchos factores, tales como el tipo de materia prima, el espacio, la producción deseada, la infraestructura, etc. Esta tecnología es, por lo tanto, flexible y se puede diseñar de múltiples maneras en función del contexto.

Se considera que la digestión anaeróbica es el método óptimo para tratar los residuos de alimentos de una manera segura para el medio ambiente. Aunque no se trata de una tecnología nueva, ya que se remonta al siglo XIX, en los últimos años ha experimentado un continuo crecimiento y desarrollo técnico [30], [12], [6].

3.2.2.2 Fermentación

La fermentación es un proceso por el cual los residuos orgánicos (principalmente agrarios) se convierten, en ausencia de oxígeno, en ácidos (como el ácido láctico) o alcoholes (como el etanol), dejando un residuo rico en nutrientes. La fermentación es de gran importancia para la producción de **bioetanol**, que es un combustible limpio que se obtiene a partir de cultivos de levaduras seleccionadas. Las plantas de fermentación en las que se obtiene el bioetanol suelen ser grandes (una

planta puede llegar a producir entre 200.000 y 300.000 toneladas de etanol al año). La producción de bioetanol en Europa y EE.UU. procede principalmente de cereales como el maíz y el trigo, mientras que en Brasil el sustrato se obtiene principalmente de la caña de azúcar. Tras la fermentación y destilación del etanol se obtiene un subproducto (el *ensilado*) que se utiliza como alimento para el ganado [6].



Figura 9. Planta de producción de bioetanol de Wilton (Reino Unido). Imagen obtenida de [tinyurl.com/ycnyy9q]

3.2.3 Depósito en vertedero con captura de gas

Los vertederos son una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero, y el metano en particular puede capturarse y utilizarse como fuente de energía. Los materiales orgánicos que se descomponen en los vertederos producen un gas compuesto, aproximadamente a partes iguales, por metano y dióxido de carbono, llamado **gas de vertedero**. El metano es un potente gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el CO₂. Capturar las emisiones de metano de los vertederos no sólo es beneficioso para el medio ambiente, ya que ayuda a mitigar el cambio climático, sino también para el sector energético.

Entre las aplicaciones del gas de vertedero se encuentran su uso directo en calderas, hornos para cemento, cerámica y ladrillos, calefactores de infrarrojos, fundiciones y generación de electricidad, por nombrar algunos. Así mismo, el gas de vertedero se utiliza cada vez más en el calentamiento de procesos mediante los cuales se crean combustibles como el biodiesel o se aplica directamente como materia prima para combustibles alternativos.

El proceso de captura del gas de vertedero (Figura 10) implica cubrir parcialmente el vertedero e instalar sistemas de recolección mediante pozos o zanjas. El gas se redirige desde los pozos hacia un colector y, con la ayuda de un extractor, se envía para su tratamiento posterior. Cualquier exceso de gas se quema para controlar las emisiones del gas.

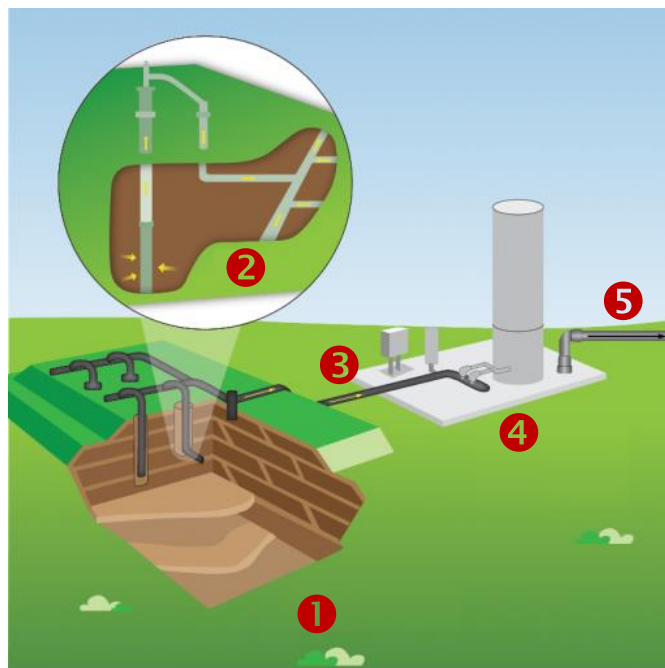


Figura 10. Recolección y tratamiento del gas de vertedero. (1) Vertedero de RSU, (2) pozo de gas de vertedero, (3) colector, (4) extractor y tratamiento, (5) hacia los consumidores. Imagen adaptada de [tinyurl.com/ybnkvds9].

Se estima que un millón de toneladas de RSU produce alrededor de 12.233 m³ al día de gas de vertedero y continuará produciéndolo durante otros 20 o 30 años después de su depósito. El gas de vertedero se considera una buena fuente de energía renovable. Los beneficios de utilizar este proceso van más allá de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y compensar el uso de recursos no renovables, pues incluye otras ventajas como los ingresos de los vertederos, la reducción de los costes de energía para los usuarios, la gestión sostenible de los vertederos, la mejora de la calidad del aire local y la creación de empleo [6].

4 La implicación de las organizaciones internacionales en el AER

En esta Sección se analizan las medidas tomadas por las organizaciones internacionales (de las que España forma parte) que se han implicado de forma notable en el aprovechamiento energético de los residuos. En particular, se analizan los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos por las Naciones Unidas (Sección 4.1) y las medidas más relevantes adoptadas por la Unión Europea (Sección 4.2).

4.1 Los objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas

El 25 de septiembre de 2015, los estados miembros de las Naciones Unidas adoptaron en la Asamblea General la resolución 70/1, denominada *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Esta resolución, que se conoce más comúnmente como los **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**, es una agenda de desarrollo global compuesta por 17 objetivos que abarcan todo tipo de asuntos: desde la energía y el clima hasta el agua, pasando por los alimentos y los ecosistemas, la salud y la pobreza, el empleo y la innovación, entre otros (Figura 11). Los ODS se consideran los sucesores de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), y representan un cambio importante en el horizonte político a nivel mundial, pues ha conseguido que el desarrollo sostenible se haya incorporado a los debates políticos nacionales e internacionales. Esto supone un importante paso adelante con respecto a los ODM, que, además de no ser de carácter universal, no trataban algunas de estas cuestiones, como es el caso de la energía que ocupa este trabajo.



Figura 11: Logotipo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Imagen obtenida de [tinyurl.com/y8nledln]

La energía se trata principalmente en el Objetivo de Desarrollo Sostenible n.º 7, que tiene como misión fundamental *“garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos”*. Este gran objetivo se sustenta en tres pilares distintos, pero relacionados entre sí [32]:

- 7.1: *De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.*
- 7.2: *De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.*
- 7.3: *De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.*

Para conseguirlos, la resolución propone que, de aquí a 2030: (7.a) se aumente *“la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia”* y (7.b) se amplíen las infraestructuras y se mejoren las tecnologías *“para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo”*.

En los últimos años, la energía procedente de los residuos ha sido el centro de atención tanto de países preocupados por el problema del calentamiento global y el cambio climático como de países en desarrollo. Las energías renovables están comenzando a ganar más atención y entre estas energías se encuentran las generadas a partir de los residuos sólidos urbanos [33]. El aprovechamiento energético de los residuos, como se estudiará en la Sección 6, contribuye al cumplimiento del séptimo objetivo de los ODS.

Las Naciones Unidas no proponen acciones concretas para lograr estos objetivos, sino que debe ser la sociedad en su conjunto (gobiernos, instituciones, empresas, ciudadanos, etc.) quien, con sus actuaciones y políticas, los lleven a cabo.

4.2 El AER en la Unión Europea

La Unión Europea ha incluido los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas entre sus políticas e iniciativas. En el caso que nos ocupa, el ODS número 7, relativo a la energía asequible y no contaminante, está incorporado en la estrategia de la Unión Europea en materia de energía. Esta estrategia persigue la seguridad y la eficiencia energética, la integración del mercado energético y la descarbonización de la economía. Las tecnologías de AER, por lo tanto, se engloban dentro de esta estrategia al ser un componente importante de la economía circular.

En esta Sección se estudian los planes y estrategias adoptados por la Unión Europea más relevantes con los que las tecnologías de AER deben estar conformes (Sección 4.2.1); a continuación, se exponen las posibles ayudas económicas de la UE que las tecnologías de AER son susceptibles de recibir (Sección 4.2.2); y, por último, se describe una serie de procedimientos que la UE considera relevantes para optimizar los objetivos climáticos y energéticos de las tecnologías de AER (Sección 4.2.3).

4.2.1 Marco de trabajo

El 26 de enero de 2017, la Comisión Europea presentó una Comunicación llamada *“El papel de la transformación de los residuos en energía”* [34], derivada de un estudio del Joint Research Centre de 2016 [18], en la que se analizaba la recuperación de energía a partir de los residuos. En este documento, la Comisión Europea reconoce que el AER es un concepto amplio, que va más allá de la mera incineración de los residuos y que abarca muchos procesos de tratamiento, cada uno de ellos con diferentes formas de generar energía (electricidad, calefacción y combustible) y diferentes impactos medioambientales. Por ello, esta Comunicación se planteó con el objetivo de garantizar que el AER que se realiza en la Unión Europea cumple con otros planes y estrategias previamente adoptados con relación a la energía y el medio ambiente, en particular (1) el **plan de acción para la economía circular de la UE**, (2) la **jerarquía de residuos de la UE**, (3) los objetivos de la **Estrategia de la Unión de la Energía** y (4) el **Acuerdo de París**. Con el fin de aclarar el marco de trabajo en el que debe encajar el AER en la UE, las siguientes subsecciones describen estas cuatro políticas.

4.2.1.1 Plan de acción para la economía circular de la UE

El 2 de diciembre de 2015, la Comisión Europea presentó un importante paquete de medidas, llamado *“Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular”* [35], para guiar la transición de la UE hacia una economía circular (descrita en la Sección 2.4.1). Este plan de acción promueve la intervención en todo el ciclo de vida de los productos, incluyendo la producción (tanto a nivel de diseño como de procesos industriales), el consumo, la gestión de residuos y el mercado de materias primas secundarias (derivadas de los residuos). Así mismo, fomenta la mejora en la gestión de los residuos, potenciando la prevención, la reutilización y el reciclaje. Así, cuando los RSU no se puedan tratar mediante estas opciones, es preferible, desde un punto de vista medioambiental y económico recuperar su contenido energético en lugar de desecharlo en el vertedero [36], [37], [38], [39].

De acuerdo con la Comisión Europea, la aplicación de estas estrategias tiene varios efectos positivos en la UE. En primer lugar, contribuye a la sostenibilidad y la competitividad a largo plazo, pues ayuda a la conservación de los recursos, incluyendo los que son escasos o los que están sujetos a variaciones de precios. En segundo lugar, favorece la creación de empleo, al abrir nuevas oportunidades de negocio en el ámbito de la fabricación y exportación de productos y servicios limpios. Y, en tercer lugar, permite consolidar el liderazgo de la UE en materia de tecnologías ecológicas, promoviendo innovaciones que proporcionan ventajas competitivas y ofreciendo a los consumidores productos más duraderos e innovadores [40].

Desde su adopción, el plan de acción se ha materializado en numerosas iniciativas concretas. Entre ellas se encuentran, por ejemplo, propuestas legislativas en materia de residuos para que, antes de 2030, se recicle el 65% de los RSU y el 75% de los envases; la adopción de un plan de trabajo para el diseño ecológico de los productos, poniendo el foco en su durabilidad, reparabilidad, capacidad de actualización, diseño para el desmontaje y facilidad de reutilización y reciclaje; un plan de acción contra la pérdida y el desperdicio de alimentos; proposiciones legislativas para la creación de fertilizantes a partir de materias primas secundarias; o el desarrollo de estrategias para hacer frente al vertido de plásticos en los océanos [41].

4.2.1.2 Jerarquía de residuos de la UE

El 19 de noviembre de 2008, el Parlamento Europeo aprobó la Directiva 2008/98/CE, denominada “*sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas*” [42], que establece el marco legislativo para la gestión (manipulación, valorización y eliminación) de los residuos en la Unión Europea. Esta Directiva, en su artículo 3, define el término *residuo* como “*cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse*”.

Para el trabajo que nos ocupa, la parte de interés de esta Directiva se encuentra en el artículo 4, que trata la jerarquía de los residuos. Esta se define de manera idéntica a como se hizo en la Sección 2.3, aunque añade una serie de apreciaciones. Por ejemplo, los estados de la UE tienen flexibilidad para potenciar las opciones de gestión de residuos con mejor resultado medioambiental. En el caso de que esto implique no seguir la jerarquía (por motivos de viabilidad técnica, económica o de protección del medio ambiente), se debe justificar. Es el caso de los materiales con sustancias peligrosas, donde la eliminación se prefiere al reciclado [32].

4.2.1.3 Estrategia de la Unión de la Energía

El 25 de febrero de 2015, la Comisión Europea estableció un paquete de medidas conocido como “*Paquete sobre la Unión de la Energía*”, con el fin de garantizar una energía sostenible, asequible, segura y competitiva en la Unión Europea. Esto, que supone una transformación profunda del sistema energético europeo, se fundamenta en una estrategia que comprende las siguientes cinco áreas: (1) la seguridad de suministro de la energía, (2) la integración del mercado europeo de la energía, (3) la contención de la demanda de energía mediante la eficiencia energética, (4) la descarbonización de la economía y (5) la investigación, la innovación y la competitividad [43].

En primer lugar, se proponen medidas para diversificar las de fuentes de energía, los proveedores y las rutas (gasoductos y oleoductos). También se plantea la colaboración entre los Estados miembros en situaciones de escasez, el refuerzo del papel de la UE en los mercados mundiales de la energía y una mayor transparencia en lo relativo al suministro de gas.

En segundo lugar, se pretende acelerar la construcción de infraestructuras para interconectar las redes de transporte de gas y electricidad entre los Estados miembros (10% de interconexión de la electricidad para 2020). A nivel nacional, se busca la independencia de los reguladores de la energía y el empoderamiento de los consumidores frente a los proveedores

En tercer lugar, se anima a los Estados miembros a primar la eficiencia energética en sus políticas, con especial atención en los sectores de la construcción (calefacción y refrigeración de edificios) y del transporte (reducción de emisiones de CO₂ de los vehículos). Así mismo, en este punto se plantea explícitamente el uso de las tecnologías de AER para integrar las políticas de eficiencia energética, las políticas de eficiencia en el uso de los recursos y la economía circular.

En cuarto lugar, se defiende una economía baja en carbono (véase Sección 2.4.2) en la que se minimice la emisión de gases de efecto invernadero mediante la reducción del uso de combustibles fósiles (Acuerdo de París). Para ello, la UE ya cuenta con una política climática fuerte que incluye el *Marco sobre clima y energía para 2030* (reducción de emisiones de GEI en al menos un 40% con respecto a 1990) y el *Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la UE* (cada Estado tiene “derecho” a emitir una cantidad de GEI y para cumplirlo puede o bien reducir las emisiones o

bien comprar derechos a otros Estados). También se plantea la inversión en energías renovables y biocombustibles.

Por último, para que la UE sea líder en la próxima generación de tecnologías renovables, debe encabezar la investigación, la innovación y la competitividad en este campo. Este enfoque se debe basar en la iniciativa *Horizonte 2020*, el mayor programa de investigación de la UE que tiene como objetivo asegurar la competitividad global [43].

4.2.1.4 Acuerdo de París

Entre el 30 de noviembre y el 11 de diciembre de 2015, tuvo lugar en París la XXI Conferencia Internacional sobre Cambio Climático organizada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Este encuentro dio como resultado el **Acuerdo de París**, que fue adoptado por 96 países más la Unión Europea (Figura 12). Este Acuerdo tiene por objetivo *“reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza”* (en su artículo 2). Con el fin de reducir los riesgos y efectos del cambio climático, los gobiernos acordaron, entre otras medidas, hacer lo posible por que el calentamiento global no supere en más de 2 °C la temperatura media mundial que había en la época preindustrial, realizando esfuerzos para que no superen los 1,5 °C.



Figura 12. Líderes políticos alzan los brazos tras adoptar el Acuerdo de París el 12 de diciembre de 2015. Foto obtenida de *Time* [<https://tinyurl.com/mk5ztvz>].

Cada parte participante en el Acuerdo se compromete a organizar, desarrollar y comunicar los avances relacionados con la mitigación del cambio climático periódicamente. Se indica también que los países desarrollados involucrados en esta lucha deberán destinar fondos públicos para la financiación de las estrategias propuestas y deberán además ser solidarios con los países en vías de desarrollo para que también consigan reducir las emisiones contaminantes. La Unión Europea ha manifestado en numerosas ocasiones su voluntad de ser líder en la lucha contra el cambio climático y ha promovido un amplio conjunto de medidas y acciones orientadas hacia una economía moderna y descarbonizada [44]. De hecho, la UE aporta de manera colectiva más ayuda económica que todos los demás donantes juntos, habiendo entregado 59.200 millones de euros en 2014 [45].

Cabe destacar que en el Acuerdo de París no se menciona ningún término relacionado con los RSU, ni con el AER. Es un documento que se limita a marcar las directrices que los países involucrados deben tomar para conseguir los objetivos propuestos [46], [47].

4.2.2 Ayudas financieras

Con el fin de fomentar el AER y la transición a una economía circular, la UE proporciona ayuda financiera por medio del **Fondo Europeo de Desarrollo Regional** (FEDER, para el desarrollo económico de las regiones menos desarrolladas de la UE) y el **Fondo de Cohesión** (fondos para financiar infraestructuras y proyectos de educación, salud y medio ambiente). La recepción de estas ayudas está condicionada a que las nuevas inversiones se ajusten a los planes de gestión de residuos desarrollados por los Estados miembros. Por ejemplo, solo se concederían ayudas para ampliar la capacidad de incineración de una planta de tratamiento de residuos en casos limitados y bien justificados que respeten los objetivos de la jerarquía de residuos [37], [48].

Otro mecanismo de financiación es el **Fondo Europeo para Inversiones Estratégicas** (FEIE, para impulsar el crecimiento económico y la competitividad a largo plazo). Este fondo tiene un papel importante en la atracción de financiación privada a través de préstamos y otros mecanismos. Por último, el programa **Horizonte 2020** (para financiar el I+D+i) también podría utilizarse para la investigación de nuevas tecnologías de AER [48].

A escala nacional, la UE aconseja que se desincentiven las ayudas públicas a opciones de gestión de RSU que no favorezcan la economía circular. Por ejemplo, la

UE recomienda a los Estados miembros que eliminen gradualmente las ayudas públicas al AER realizado a partir de residuos mixtos (como las incineradoras) para potenciar la recogida selectiva y el reciclado [48].

4.2.3 Optimización de los procesos de AER

La Comisión Europea presentó en su Comunicación una serie de observaciones para optimizar el modo en que contribuyen los procesos de AER a los objetivos climáticos y energéticos que defiende la UE.

En primer lugar, la Comisión prevé cambios en las materias primas destinadas al AER. Con las leyes actuales y las propuestas de la economía circular (recogida selectiva, mayores tasas de reciclado) se espera una reducción de los **residuos mixtos**, que actualmente representan un porcentaje considerable en procesos de recuperación energética mediante incineración. Un ejemplo de ello se da en Liubliana (Eslovenia), que lleva desde 2011 invirtiendo en la recogida selectiva y ya ha alcanzado una tasa del 60% con respecto al total de RSU generados (Figura 13). En cuanto a la recogida selectiva de **residuos biodegradables**, debería terminar en el aumento de la producción de biogás y de abonos provenientes de la digestión anaeróbica. Un ejemplo de tratamiento de residuos biodegradables mediante digestión anaeróbica se da en la planta de biogás de Milán, que recoge casi el 100% de los residuos orgánicos. A plena capacidad abastece de energía a 24000 personas (35.880 MWh) y produce 14.400 toneladas de abono. Con respecto a los **aceites y grasas comestibles**, todavía se puede mejorar la eficiencia en su recogida y tratamiento, lo que permitiría la elaboración de biodiesel para el transporte y aceites vegetales hidrogenados para la aviación. Con los **residuos plásticos** existen grandes variaciones entre los Estados miembros, pero se observa que, en los últimos diez años, su depósito en vertederos ha disminuido mientras que su incineración ha aumentado. Esto indica que todavía hay que mejorar su reciclaje y reutilización. Por último, los **residuos de madera** se usan en procesos de incineración, aunque se prefiere incidir en el reciclado y evitar su depósito en vertederos [48].

En segundo lugar, la Comisión propone el uso de las técnicas con mayor eficiencia energética para el AER, pues solo así se mejora la contribución a los objetivos climáticos y energéticos. Según un estudio la Comisión, en 2014 casi el 1,5% de la energía consumida en la UE provenía de procesos de AER, principalmente incineración y digestión anaeróbica; es decir, unos 676 PJ (petajulios, 10^{15} julios). Si se aplicasen de forma conveniente todas las técnicas demostradas, la cantidad de energía recuperada podría aumentar hasta los 872 PJ/año con la misma cantidad de

residuos. Las mejores técnicas para aumentar la eficiencia de los procesos de AER, según un estudio de la Comisión [49], son las siguientes:

- **Incineración y gasificación en la misma instalación.** De esta forma, el gas de síntesis obtenido en la gasificación se puede utilizar en los procesos de combustión, remplazando así a los combustibles fósiles en la producción de electricidad y calor.
- **Incineración de residuos en instalaciones especializadas.** Esto permite el aprovechamiento de la energía de los gases de escape, la distribución del calor de los residuos a través de redes de calefacción urbana, etc.
- **Digestión anaeróbica** en instalaciones que revalorizan el biogás en metano para su distribución y uso posteriores.

Por último, se menciona que es más eficiente desarrollar parques industriales en los que exista una planta de transformación de residuos que se alimente de los residuos generados por el parque y que, a su vez, la planta abastezca al parque de electricidad y calor [48].



Figura 13. Contenedores de separación selectiva de residuos en Liubliana (Eslovenia). Foto obtenida de *National Geographic* [<https://tinyurl.com/yc7m49w5>].

5 El AER en España

En esta Sección se expone la normativa española más relevante en materia de energía, cambio climático y transición a la economía circular. Destacan la Estrategia Española de Economía Circular (Sección 5.1.1), el Plan de Energías Renovables para el periodo 2011-2020 (Sección 5.1.2) y Ley de Cambio Climático y Transición Energética (Sección 5.1.3). A continuación, se describe la gestión de los RSU y su aprovechamiento energético en el ámbito de la Comunidad Valenciana (Sección 5.2).

5.1 Marco legal

5.1.1 Estrategia Española de Economía Circular

La Estrategia Española de Economía Circular [50], más conocida como *España Circular 2030*, es un conjunto de medidas que nace para promover en España el Plan de Acción para la Economía Circular de la UE (Sección 4.2.1.1). Esta estrategia se plantea con la ambición de ser el proyecto de referencia a nivel nacional que garantice el salto hacia el modelo de economía circular.

Para pasar de una economía lineal a una circular, resulta necesario realizar cambios en el actual modelo español de producción y consumo. Entre los objetivos estratégicos planteados para conseguir dicha meta se encuentran los siguientes:

- Fomentar la reutilización, alargar el ciclo de vida de las materias primas para preservar el medio ambiente y asegurar la calidad de vida de las personas.
- Reducir la utilización de los recursos no renovables y de las sustancias tóxicas en los procesos de fabricación. Facilitar la valorización energética de los productos cuando estos llegan al final de su vida útil.
- Promover la aplicación de la Jerarquía de los Residuos de la UE (Sección 4.2.1.4).
- Aplicación de políticas laborales encaminadas al desarrollo de empleo en nuevas áreas que favorezcan la transición a la economía circular.

Por tanto, se observa que la gestión de los residuos tiene un papel muy importante en la transición hacia un modelo económico sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Para conseguir esta transición, se proponen diversas políticas ambientales en materia de tratamiento de residuos, entre las que se encuentran la simplificación de actividades de coordinación, la elaboración de normativa propia, la celebración de jornadas técnicas y el uso de aplicaciones informáticas comunes a nivel nacional.

Por lo que respecta al plazo de desarrollo de la estrategia, se plantea un primer periodo denominado *Plan de Acción 2018-2020*. Esta fase se compone de 70 actuaciones, de las cuales 11 (las comprendidas entre la 20 y la 30) están relacionadas directamente con los residuos y su gestión. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes:

- Revisión cada seis años, o menor tiempo dependiendo de las circunstancias, de la normativa en materia de gestión de residuos.
- Revisión de las normativas nacionales en materia de residuos con el fin de adecuarlas a las directrices europeas.
- Las tasas de reutilización y reciclado para el año 2025 deben ser del 60%, y para el año 2030 del 65%. Se establece un margen de tiempo extra de 5 años para los 7 países (entre los que se incluye España) que tienen actualmente porcentajes menores del 20%.
- Revisión y actualización de la situación actual relativa a los impuestos en materia de residuos. Actualmente hay comunidades autónomas que sí pagan tasas por la gestión de los residuos y otras en las que no.
- Habilitar laboratorios en los centros de tratamiento de residuos en los que se analice la composición de los residuos para valorar su toxicidad y así establecer cuál es su tratamiento más adecuado.

En definitiva, en materia de residuos la Estrategia Española de Economía Circular propone la realización de un tratamiento de los residuos eficaz conforme a la Jerarquía de los Residuos de la UE, la revisión y renovación de la normativa existente en materia de gestión de residuos con el fin de adecuarla a las directivas europeas, así como aumentar el control de los residuos.

5.1.2 Plan de Energías Renovables 2011-2020

El *Plan de Energías Renovables*, más conocido como PER, tiene como objetivo que al menos un 20% del consumo energético en España provenga de fuentes renovables [51]. Este Plan, que se aprobó el 11 de noviembre de 2011, va en línea con la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo “*relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables*” [52].

Las fuentes de energía que el PER considera como renovables son: los biocarburantes, el biogás, la biomasa, las energías del mar, el sector eólico, el sector geotérmico y otras energías del ambiente, el sector hidroeléctrico, los residuos, el sector solar térmico y el sector solar termoeléctrico. Con respecto a los residuos, el

PER puntualiza que solo la parte biodegradable de estos se puede considerar como fuente renovable y que, a falta de datos reales lo bastante representativos, se ha adoptado un valor del 50%, que es el recomendado por la Agencia Internacional de la Energía.

En cuanto a la evolución de las tecnologías de AER en España durante el periodo 2011-2020, el PER estimó que las tecnologías de conversión térmica ya eran plenamente maduras y no esperaba cambios significativos durante esta década. En cambio, consideró que el biogás generado por digestión anaeróbica sería la tecnología que más se desarrollaría durante esta década y esperaba una potencia generada de 400 MW. A día de hoy (2018), no se superan los 180 MW [53].

5.1.3 Ley de Cambio Climático y Transición Energética

Con el fin de reducir las emisiones de GEI y contrarrestar los efectos del calentamiento global, el Gobierno de España está desarrollando una *Ley de Cambio Climático y Transición Energética*. Se trata de una normativa que se encargará de abordar los instrumentos necesarios para mitigar el cambio climático y sus consecuencias. Mediante esta Ley se impulsará el proceso de transición hacia una economía sostenible, de acuerdo con los compromisos europeos en materia de protección medioambiental, y aspirará a favorecer el desarrollo de empleo en ese ámbito. Sin embargo, todavía no se ha redactado el borrador definitivo de la Ley, aunque el Gobierno prevé que estará listo a finales de 2018. El proyecto tendrá por objetivo promover los siguientes asuntos [54], [55]:

- Cumplimiento de los ODS número 7 (energía asequible y no contaminante) y número 13 (acción por el clima).
- Reducción de un 20% de las emisiones de GEI en 2030 y de un 90% en 2050 con respecto a los niveles registrados en 1990.
- Apoyo a los trabajadores de aquellos sectores afectados por la transición hacia la descarbonización de la economía.

5.2 La gestión de los RSU en la Comunidad Valenciana

La legislación valenciana en materia de gestión de RSU está compuesta por el **Plan Integral de Residuos (PIR)**, mediante el cual se regulan las actividades relativas a la gestión de los RSU dentro de la comunidad autónoma, y por la **Ley Valenciana de Residuos** de 2000, en la cual se establece que corresponde a los municipios la competencia en materia de gestión de RSU, incluyendo las actividades relativas a su

recogida, transporte, valorización y eliminación. Estas cuatro actividades se describen a continuación.

Por un lado, la recogida y transporte de los RSU en la Comunidad Valenciana se llevan a cabo por empresas privadas, previa adjudicación por parte del ayuntamiento de cada municipio, asumiéndose los costes mediante impuestos a los ciudadanos. Por otro lado, el PIR establece una división de la Comunidad Valenciana en 13 áreas de gestión para llevar a cabo la valorización, tratamiento y eliminación de los residuos. En la Figura 14 se muestra qué entidad controla cada área de gestión, y a qué área geográfica corresponde cada una de ellas. Las entidades encargadas de la gestión de la valorización, tratamiento y eliminación de los RSU no han aplicado ninguna tarifa, siendo también los ayuntamientos de cada municipio los encargados de sufragar ese gasto.

ÁREAS DE GESTIÓN			ENTIDAD DE GESTIÓN
Denominación según PIR CV	Denominación según PIR 1997	Área Geográfica	
C1	I	Norte Castellón	Consorcio
C2	II, IV y V	Castellón Centro	Consorcio
C3-V1	AG2 III y VIII	Sur Castellón-Norte Valencia	Consorcio
V2	AG1 III y VIII	Área Metropolitana Valencia	EMTRE
V3	VI, VII y IX	Valencia interior	Consorcio
V4	AG1 X, XI y XII	Las Riberas	Consorcio
V5	AG2 X, XI y XII	Valencia Sur	Consorcio
A1	XV	Las Marinas	Consorcio
A2	XIV	Alcoià y Comtat	Consorcio
A3	XIII	Alt Vinalopó	Consorcio
A4	XVI	Alicante ciudad	Ayto. de Alicante
A5	XVIII	Baix Vinalopó	Consorcio
A6	XVII	Vega Baja	Consorcio



Figura 14. A la izquierda: tabla con las áreas de gestión de residuos de la Comunidad Valenciana; a la derecha: mapa con las áreas de gestión de residuos en la Comunidad Valenciana [56].

La Tabla 2 muestra que en la Comunidad Valenciana existen 8 instalaciones para la valorización de residuos, 5 de ellas en la provincia de Alicante [66]. La Directiva 2008/98/CE de la Unión Europea define valorización como “*cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular*” [42]. Por lo tanto, la valorización de los residuos no implica necesariamente su aprovechamiento energético e incluye otras opciones como el reciclaje. Desde mayo de 2018, existe una normativa comunitaria que fija unos objetivos de reciclaje de RSU que irán aumentando gradualmente hasta el 65% en 2035.

Provincia	RECOGIDA	VALORIZACIÓN	ELIMINACIÓN
	Estaciones de transferencia	Plantas de valorización	Vertederos
Alicante	1 (Alcoi) 1 (Calpe) 1 (Denia) 1 (Benidorm)	1 (Villena) 1 (Xixona) 1 (Alicante) 1 (Elche) 1 (Crevillente)	1 (Villena) 1 (Xixona) 1 (Alicante) 1 (Aspe) 1 (Elche)
Castellón	1 (Almassora) 1 (Segorbe)	1 (Onda)	1 (Villafranca del Cid) 1 (Tales) 1 (Onda)
Valencia	1 (Sagunto) 1 (El Palomar) 1 (Oliva)	1 (Quart de Poblet) 1 (Guadassuar)	1 (Dos Aguas) 1 (Ademuz) 1 (Alpuente)

Tabla 2. Instalaciones de gestión de residuos urbanos de la Comunidad Valenciana a fecha de 31 de diciembre de 2007 [66].

En cuanto a la **eliminación**, la Ley Valenciana de Residuos obligaba a las empresas a pagar una tasa por el depósito de sus residuos en los vertederos. Sin embargo, este impuesto ha sido revocado con la última reforma de la Ley en 2018, de manera que ahora solo se aplicará a las empresas que eliminen los residuos peligrosos mediante incineración. Además, para llevar a cabo el vertido de residuos municipales e industriales basta con aportar una declaración responsable, la cual, ni siquiera requiere de control por parte de la Administración. Actualmente, solo se mantienen las tasas de incineración de residuos peligrosos, aunque los precios por tonelada incinerada se han rebajado este año. Este conjunto de medidas se aleja de las pretensiones europeas en materia de gestión de residuos, ya que no se fomenta la reducción de la contaminación, sino que se propicia el aumento del volumen de residuos en los vertederos.

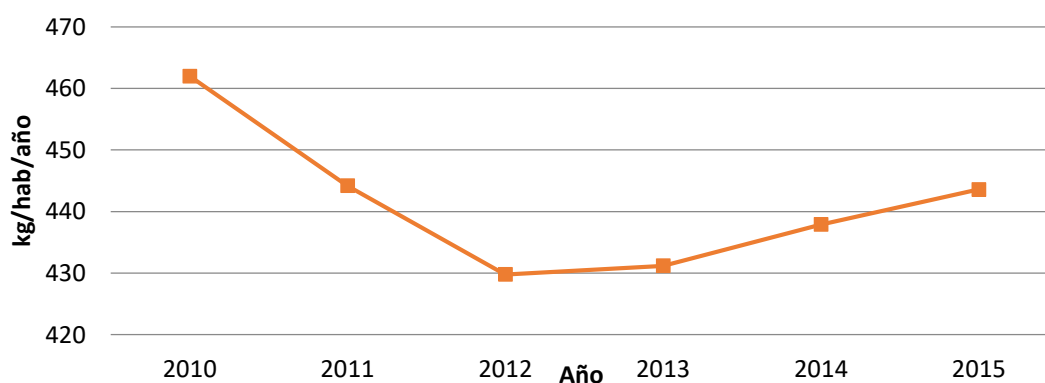


Figura 15. Cantidad de RSU generados en la Comunidad Valenciana entre 2010 y 2015. Elaboración propia a partir de datos del INE [60].

Por último, la Figura 15 muestra la cantidad de RSU generados en la Comunidad Valenciana. Se observa un descenso hasta 2012, momento en que la cifra vuelve a ascender. En la Figura 16, se puede encontrar la composición de los RSU de la Comunidad Valenciana en comparación con los de España. Actualmente existen diez vertederos en la Comunidad y su implantación suele causar malestar entre la población de los municipios colindantes. Además, hay que tener en cuenta que también existen, contabilizados hasta el momento, treinta basureros ilegales. Algunos de ellos son creados por empresas en zonas poco frecuentadas, y se utilizan para verter sus residuos ilegalmente y evadir así el pago de las tasas municipales [57], [58], [56], [59].

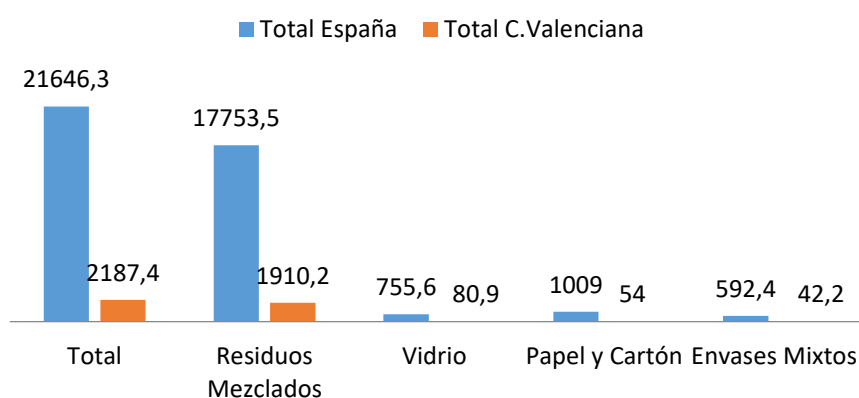


Figura 16: Comparativa entre la cantidad de RSU generados en la Comunidad Valenciana y el total de en 2015 en miles de T. Elaboración propia a partir de datos del INE (Anexo K) [60].

6 Análisis de la situación actual del AER en España

En esta Sección se analiza la situación actual de España en materia de gestión de residuos de acuerdo con la normativa europea, el papel que su aprovechamiento energético tiene en la economía circular, así como su potencial tecnológico para la descarbonización de la economía y el cumplimiento de los compromisos de reducción de emisiones de GEI.

6.1 Estadísticas sobre gestión y tratamiento de RSU en España

6.1.1 RSU y su AER en función del material

La Figura 17 muestra la cantidad de residuos generados en España durante el año 2012 (en T/año) en función del material (recogida selectiva). Para cada material, se indica qué cantidad se ha destinado a la recuperación energética. Se añaden los datos relativos a los residuos mixtos, que contienen cantidades sin determinar de los materiales anteriores.

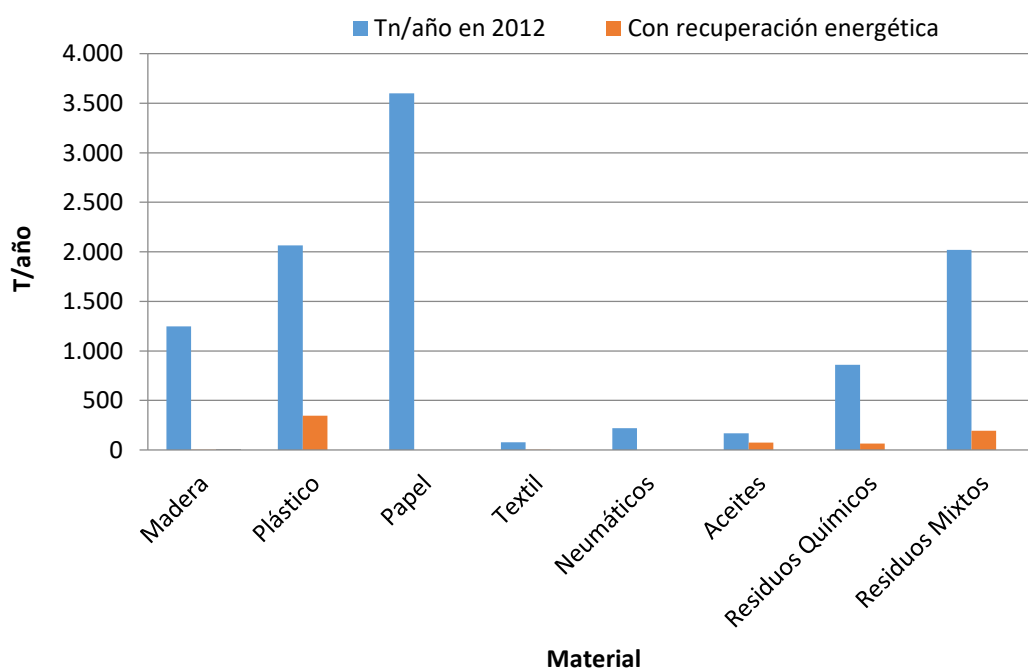


Figura 17. Cantidad de residuos generados en España en 2012 y su AER en función del material (T/año). Elaboración propia a partir de datos de Eurostat [61].

Se observa, en primer lugar, que los materiales que mayoritariamente componen los residuos que se generan en España son el papel, el plástico y la madera. Con respecto al papel, no existe recuperación energética porque se recicla. En cuanto al

plástico, es el que mayor aprovechamiento energético tiene. Según datos de la Oficina Europea de Estadística (Eurostat) (véase Anexo D), en 2012 se generaron 2.065 toneladas de residuos plásticos. De esa cantidad, el 55% fue destinado a los vertederos, más de la mitad, mientras que el 28% fue reciclado y sólo el 17% fue tratado para su recuperación energética [18]. El resto de materiales recibe un tratamiento similar: el depósito en vertederos siempre es mayor que otras opciones de tratamiento más conforme a un modelo económico circular.

6.1.2 Tratamiento de los RSU en España

De la Sección anterior, resulta llamativo cómo para cada grupo de materiales la recuperación energética es tan pequeña. Para analizar mejor esta situación, en la Figura 18 se muestra una gráfica relativa al tratamiento de residuos en España entre los años 2008 y 2016.

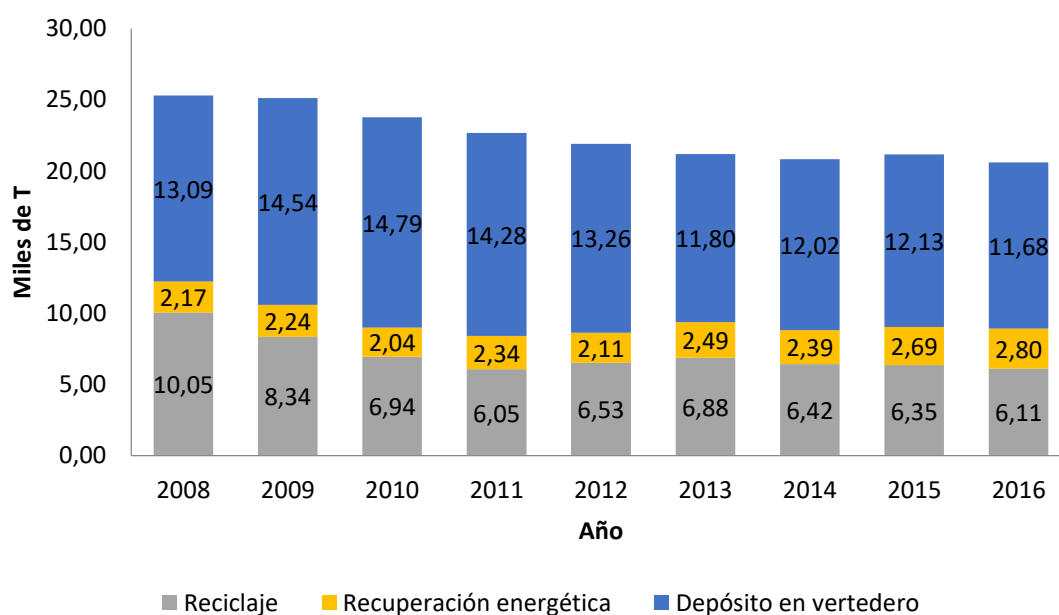


Figura 18. Tratamiento de los RSU en España entre 2008 y 2016 (miles de T). Elaboración propia a partir de datos de Eurostat [61].

A grandes rasgos, se observa una curva descendente en la generación de RSU, que puede deberse a los efectos de la crisis económica iniciada en 2008. En cuanto a su tratamiento, para todo el periodo existe una mayor cantidad de residuos tratados mediante reciclaje que mediante recuperación energética. Esto es positivo, ya que, según la Jerarquía de los Residuos de la UE (Sección 4.2.1.2), se prefiere el reciclaje (en gris) a la recuperación energética (en amarillo). Sin embargo, la cantidad de RSU

depositados en vertederos (en azul) supera al resto de opciones de tratamiento en su conjunto, a pesar de que se trata de la opción más desfavorable.

En el año 2016, en España se recicló el 29,7% de los residuos, el 13,6% se recuperó energéticamente, mientras que el 56,7% restante se depositó en vertederos. Esta situación resulta insostenible a largo plazo debido a los actuales ritmos de crecimiento y consumo, por lo que las políticas nacionales en materia de gestión de residuos se deben orientar a disminuir el porcentaje de RSU en vertederos y a aumentarlo en el resto de opciones de tratamiento. De no ser así, no se cumplirán los objetivos para la transición a una economía circular. Actualmente, la opción predominante de tratamiento de residuos (el depósito en vertedero) es la más contaminante y la que más emisiones de gases de efecto invernadero produce a la atmósfera. Combatir esta situación pasa por invertir en investigación y desarrollo de tecnologías de AER.

La Figura 19 muestra que el porcentaje de residuos depositados en los vertederos fue aumentando cada año hasta 2011, momento en el que alcanzó el mayor pico para el periodo estudiado, con un 63%. A partir de ese año, el porcentaje fue disminuyendo hasta 2013, que registró un mínimo relativo con un valor del 55,8%. Desde 2014 hasta 2016, que es el último año con datos disponibles, la tendencia es descendente (Ver anexo F).

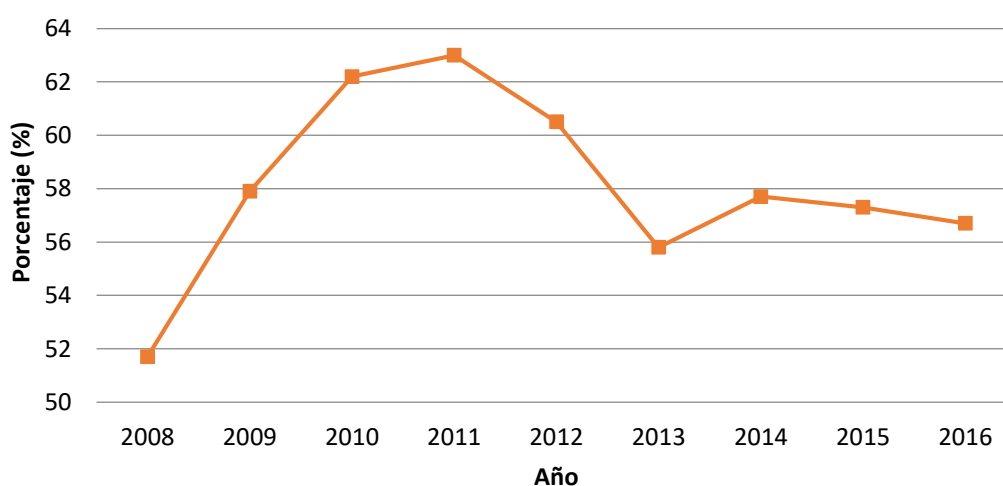


Figura 19. Porcentaje de RSU depositados en vertederos en España entre 2008 y 2016. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de Eurostat [61].

6.1.3 Tratamiento de los RSU en la UE

Con el fin de comparar la situación de España con respecto a países de su entorno, en esta Sección se hace un análisis similar al anterior, pero con datos de la

Unión Europea. En general, la gestión de los residuos en el conjunto de la UE es más respetuosa con el medio ambiente. Al contrario que en España, la cantidad de RSU depositados en vertederos no supera las cantidades destinadas a reciclaje y a recuperación energética en su conjunto (Figura 20, Anexo G). Además, la cantidad relativa al depósito de residuos en los vertederos está disminuyendo con el paso de los años, mientras que las cantidades relativas al reciclaje y al AER aumentan.

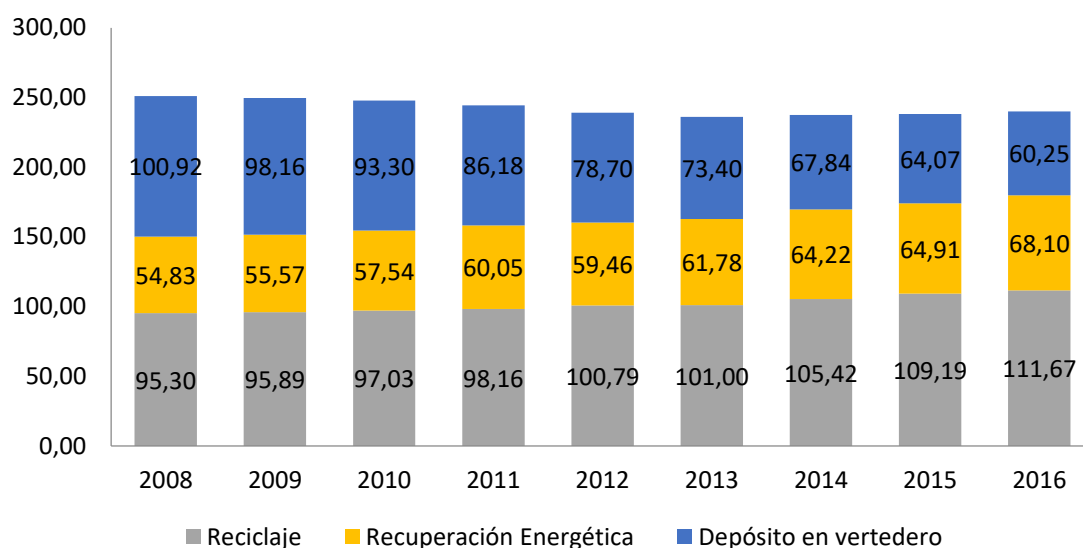


Figura 20. Tratamiento de RSU en Europa entre 2008 y 2016. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de Eurostat [61].

6.1.4 Producción energética en España

El peso de la producción de energía eléctrica a partir de RSU en España es prácticamente despreciable: solo un 0,6% de la energía se obtiene mediante valorización. Este dato se obtiene de la Figura 21, que indica que la parte renovable de la energía obtenida mediante RSU es del 0,3%. Como se indicó en la Sección 5.1.2, la mitad de las energías procedentes de los residuos se considera renovable, mientras que la otra mitad no. Por lo tanto, el otro 0,3% está incluido como “otras fuentes” dentro del gráfico. Si se contabilizase toda la energía eléctrica producida a partir de biogás, que también se puede obtener a partir del aprovechamiento energético de los residuos, el valor total llegaría al 0,9%. En comparación, la energía generada mediante combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) y, en consecuencia, emisoras de gases de efecto invernadero, supera el 43%.

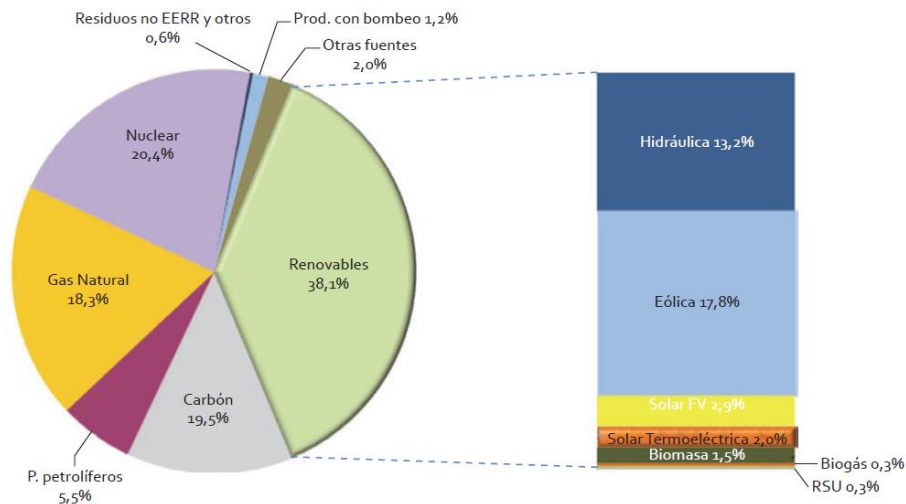


Figura 21. Origen de la energía eléctrica generada en España en 2016 [62].

6.1.5 Evolución de las emisiones de GEI en España

España es uno de los países de la Unión Europea en el que más aumentaron las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en 2017 [63]. En la Figura 22 se observa la evolución de las emisiones de GEI en España en los últimos años [64]. Se han considerado los 6 GEI más relevantes (el dióxido de carbono, el metano, el óxido nítrico y los gases fluorados, compuestos por el carburo hidrofluorado, el carburo perfluorado y el hexafluoruro de azufre), cuyos datos se muestran en el Anexo J. Las emisiones aparecen medidas en miles de toneladas de CO₂ equivalente: por ejemplo, una molécula de metano tiene el mismo efecto en la atmósfera que 21 moléculas de CO₂. El resto de equivalencias figura en el Anexo H.

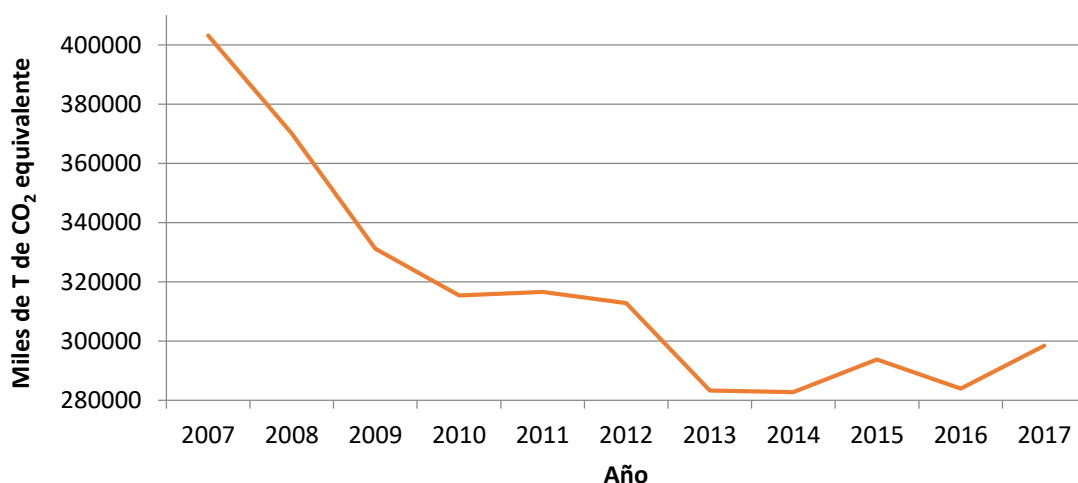


Figura 22. Emisiones de gases de efecto invernadero en España entre 2010 y 2017 [64].

Un informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) asegura que si no se toman medidas a nivel internacional para frenar el actual avance del calentamiento global, la temperatura se incrementará en 1,5°C entre 2030 y 2050 [65].

6.1.6 El AER en la Comunidad Valenciana

Por ello, uno de los planteamientos iniciales a la hora de abordar este trabajo consistía en la realización de una comparativa entre las distintas plantas de la provincia de Alicante, atendiendo al tipo de residuos tratados, la valorización aplicada, el rendimiento al que funcionan, su capacidad, etc. Estas plantas de valorización son: *VAERSA* en Villena; *Reciclados y Compostaje Piedra Negra* en Jijona; *INUSA* en Alicante; *Consorcio del Baix Vinalopó* en Elche; y *Abonos Orgánicos Nacionales S.A.* en Crevillente. Todas estas plantas han sido contactadas para concretar una visita de las instalaciones o, en caso contrario, recibir información relacionada. Sin embargo, estas empresas o bien no atendieron las peticiones (Villena, Jijona) o bien no podían ser atendidas en ese momento (Elche, Alicante, Crevillente). La información disponible en los sitios web de estas empresas no es suficiente para realizar el análisis deseado.

6.2 Repercusión medioambiental de las tecnologías de AER en España

6.2.1 Composición de las emisiones de GEI en España

El siguiente estudio tiene por objeto calcular qué cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero producidas como consecuencia de la generación de energía a partir de fuentes no renovables se podría evitar si dicha energía procediera de tecnologías de AER. Esto permitirá saber si las técnicas de generación de energía a partir de los RSU suponen realmente un beneficio para el medio ambiente.

Para abordar este estudio, resulta necesario, en primer lugar, conocer la tipología de gases de efecto invernadero generados y sus fuentes de producción principales. La Figura 23 muestra, para el año 2017, la proporción en la que se produjeron en España emisiones de los distintos gases de efecto invernadero, mientras que las fuentes de producción principales de estos gases se muestran en la Figura 24 (ver anexo I) [64].

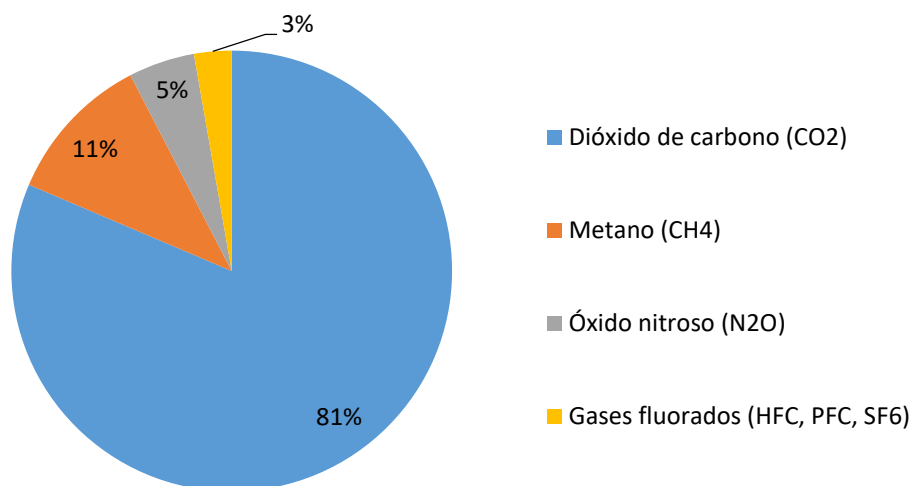


Figura 23. Producción de gases de efecto invernadero por tipo en España en 2017 sobre un total de 298,47 millones de toneladas de CO₂ equivalente [64].

La mayoría de las emisiones corresponden al **dióxido de carbono**, con un 81,4%. Este gas entra en la atmósfera a través de la quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), residuos sólidos urbanos o como resultado de algunas reacciones químicas. A continuación, le sigue el **metano**, con un 11% del total. Este gas se genera en la producción y transporte de los combustibles fósiles, en la ganadería (fermentación entérica) y como consecuencia de la descomposición de materia orgánica en los vertederos. Le sigue el **óxido nitroso**, con alrededor de un 5% del total. Estos gases se producen por la quema de combustibles fósiles o como resultado de actividades industriales. En menor proporción, cerca del 3%, se emitieron **gases fluorados** (carburo hidrofluorado, carburo perfluorado y hexafluoruro de azufre). Estos gases no proceden de fuentes naturales, sino que son siempre el resultado de la actividad humana (refrigerantes, industria del aluminio, etc.). Se emiten en cantidades pequeñas porque existen normativas restrictivas al respecto y tienen un potencial de calentamiento atmosférico muy elevado en comparación con otros gases de efecto invernadero. Concentraciones pequeñas pueden tener efectos muy notables sobre la temperatura global. En el Anexo J se indican las cantidades relativas a cada porcentaje en miles de toneladas.

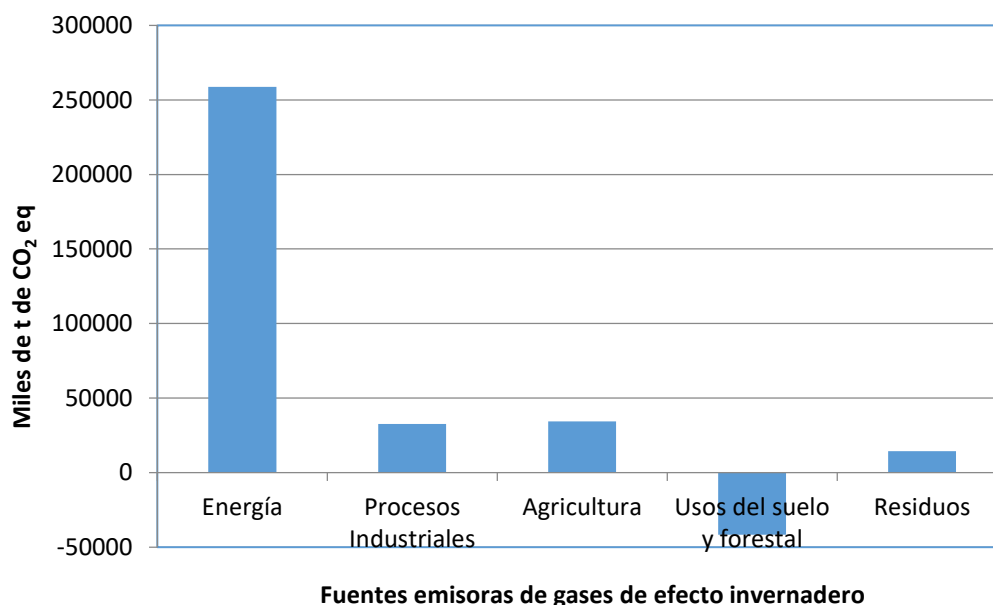


Figura 24. Fuentes de producción de gases de invernadero sobre un total de 298,47 millones de toneladas de CO₂ equivalente. Se muestra también el gas absorbido por la vegetación [64].

6.2.2 Estimación de las emisiones de GEI por fuente

Puesto que no se han encontrado datos para España relativos a las emisiones de GEI por sectores, se va a realizar una estimación a partir de los datos proporcionados por la Agencia de Protección Medioambiental (EPA) de Estados Unidos [67]. La Figura 25 muestra los tipos de gases de efecto invernadero y la proporción en la que estos se emitieron en Estados Unidos en el año 2016. Cuando se comparan estas emisiones con las producidas en España (Figura 23), se observa que las proporciones son casi idénticas en ambos casos. De hecho, todos los países de la OCDE tienden a tener comportamientos similares en este contexto, por lo que las conclusiones que se obtienen para uno de ellos son válidas para el resto [10], [68]. A partir de aquí, se van a utilizar datos de la EPA de EE.UU. para respaldar este análisis.

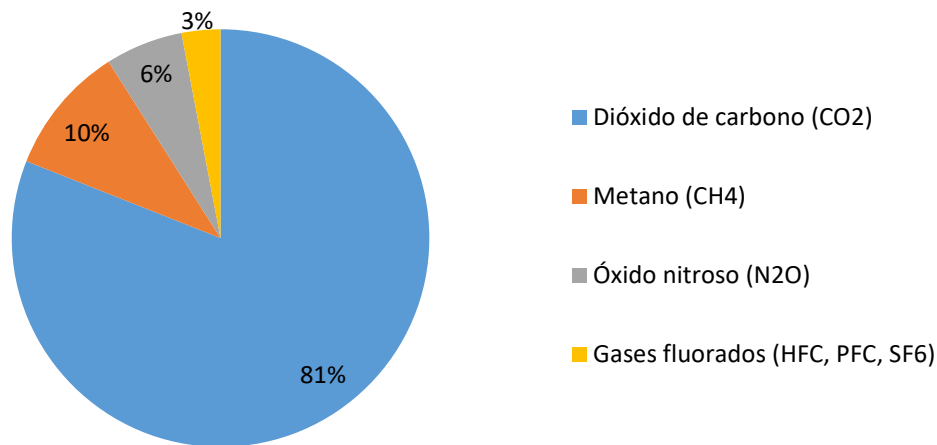


Figura 25. Producción de gases de efecto invernadero por tipo en EE.UU. en 2016 sobre 6511 millones de toneladas de CO₂ equivalente [67].

Este análisis se centra en el estudio de la repercusión medioambiental de las técnicas de AER como alternativa a las energías tradicionales. Por ello, se van a examinar aquellas fuentes de emisión de GEI *antropogénicas* (generadas por la acción humana) susceptibles de ser sustituidas por energías procedentes de los residuos.

6.2.2.1 Dióxido de carbono

Se analiza en primer lugar la situación del **dióxido de carbono**. Se trata del gas de efecto invernadero con mayores emisiones a la atmósfera. En la Figura 26 se muestran los porcentajes de emisiones de este tipo de gas por fuente.

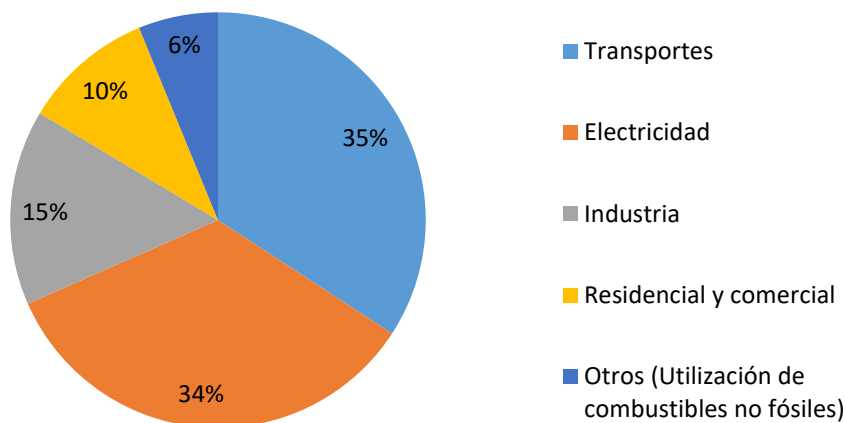


Figura 26. Tasas de emisión de dióxido de carbono por fuente en EE.UU. en 2016 [67].

Se observa que las dos fuentes mayoritarias de producción de dióxido de carbono son la generación de **electricidad** y el **transporte**. Ambas suman el 69% del total. Por lo que respecta a la electricidad, su producción mediante la quema de combustibles

fósiles es una de las principales fuentes de CO₂. Este sector representa un 34% del total de las emisiones. Por otra parte, la utilización de combustibles fósiles como la gasolina y el diésel para el transporte también contribuyeron con una proporción similar en la emisión de este gas. En cuanto al sector de la **industria**, (15% del total de las emisiones) son muchos los procesos en los que la generación de CO₂ se debe a reacciones químicas, como por ejemplo en la fabricación de cemento u otros productos químicos. Otros procesos industriales responsables de la emisión de este gas utilizan electricidad y, por lo tanto, se engloban indirectamente en esa fuente de producción. El 16% restante, procedente del sector **residencial y comercial** y de la **utilización de combustibles no fósiles**, no se tendrán en cuenta en este estudio al ser minoritarios.

6.2.2.2 Metano

Con respecto al **metano**, la Figura 27 muestra su producción por fuente:

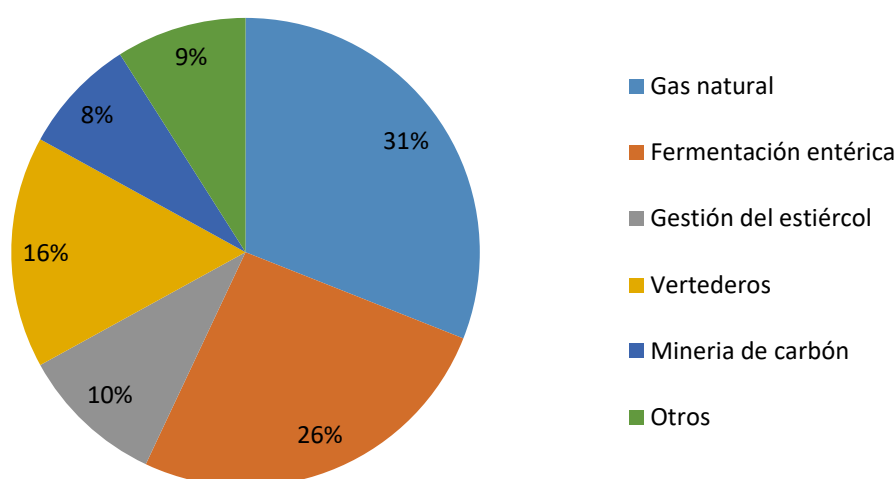


Figura 27. Tasas de emisión de metano por fuente en EE.UU. en 2016 [67].

El metano es el componente principal del **gas natural**, por ello, la mayoría de las emisiones de metano se producen como consecuencia de la producción, almacenamiento y distribución del gas natural. Por otra parte, la descomposición de los residuos en **vertederos** también genera este gas, con un 16% que procede de esta fuente. Como parte de su proceso digestivo normal, el ganado doméstico produce grandes cantidades de metano (**fermentación entérica**); un 26% de las emisiones procede de esta fuente. Cuando el **estiércol** de estos animales se almacena, también se produce metano (10% sobre el total). Se observa que el sector agrícola supone una fuente importante de emisiones de metano. Por lo tanto, las emisiones de metano

producidas por la fermentación entérica y el estiércol se deben a procesos naturales, mientras que las emisiones de metano generadas por procesos extractivos, el gas natural y los vertederos son debidas a la acción humana.

6.2.2.3 Óxido nítrico

En la Figura 28 se muestra la gráfica correspondiente a las principales fuentes de emisión de óxido nítrico.

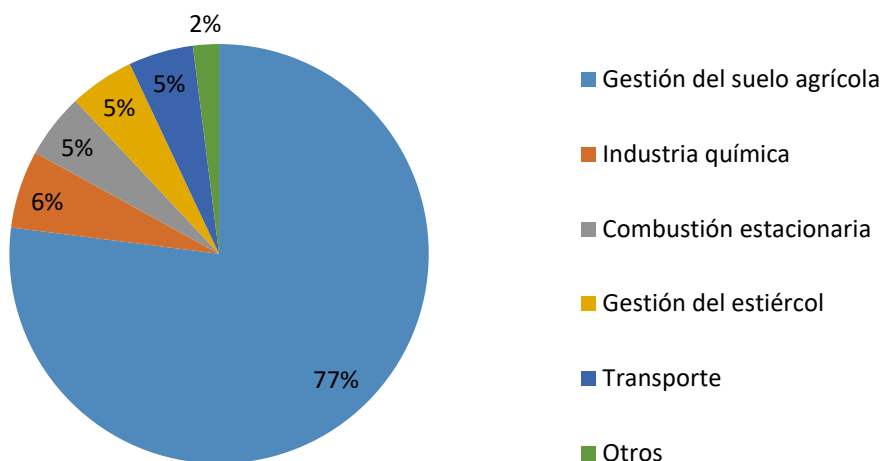


Figura 28. Tasas de emisión de óxido nítrico por fuente en EE.UU. en 2016 [67].

La producción de este gas de efecto invernadero se debe en un 77% al **sector agrícola**. Esta fuente incluye la aplicación de fertilizantes sintéticos, la gestión del estiércol o la quema de los residuos agrícolas. En menores proporciones, las emisiones de este tipo de gas se deben a **procesos industriales** (6% del total), como por ejemplo la fabricación de fertilizantes sintéticos o fibras como el nylon, y a la quema de **combustibles** (5% del total).

6.2.2.4 Gases fluorados

Por último, se adjunta la gráfica correspondiente a las fuentes de producción de **gases fluorados** (Figura 29).

Un 92% del total de las emisiones de gases fluorados corresponde a los **refrigerantes de tercera generación**. Estos productos químicos fueron desarrollados para sustituir a otras sustancias que eran perjudiciales para la capa de ozono. En menor proporción, las emisiones de estos gases son debidas a la **industria del aluminio** (6% del total) y a la **transmisión y distribución de electricidad** (2% del total).

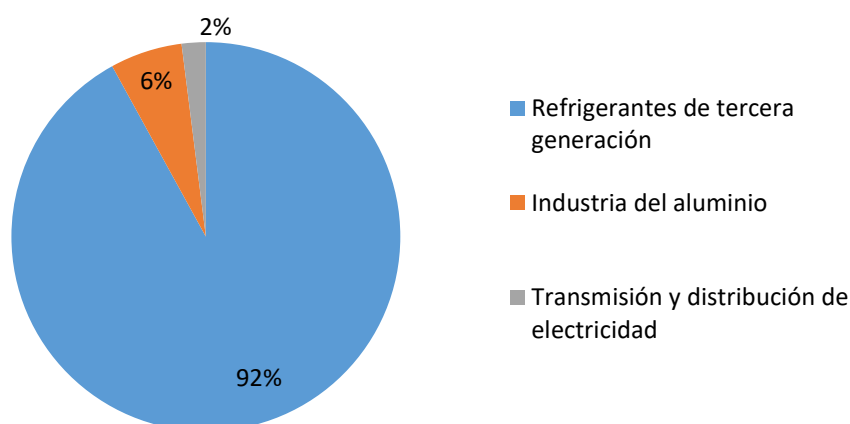


Figura 29. Tasas de emisión de gases fluorados por fuente en EE.UU. en 2016 [67]

6.2.3 Relación entre generación eléctrica y emisiones de CO₂

A continuación se realiza un estudio que compara la generación eléctrica y las emisiones de CO₂ de los combustibles fósiles más comunes y el aprovechamiento energético de residuos por incineración y fermentación (biodiesel).

6.2.3.1 Generación de energía por incineración

En esta Sección se van a valorar las ventajas y las desventajas desde un punto de vista analítico del aprovechamiento energético de los RSU frente a otras fuentes energéticas tradicionales. Para ello, se van a comparar las emisiones de CO₂ y la energía generada tanto por los combustibles fósiles más usados como por los residuos. La Tabla 3 muestra la cantidad de energía (en kWh) producida por cada unidad (de masa o volumen) de combustible (**factor de conversión**) y las emisiones de CO₂ equivalente producidas por cada kWh de energía generado para cada combustible (**factor de emisión**). Los combustibles analizados son: el gas natural, el gasóleo, el fuelóleo, el gas licuado del petróleo, el carbón (tanto nacional como de importación), el gas butano y, finalmente, los residuos sólidos urbanos.

Todos los valores de los factores de conversión y emisión, excepto los relativos a los RSU (en gris en la Tabla 3), han sido obtenidos de la Cámara de Comercio de Aragón [69]. Los correspondientes a los RSU (en naranja en la Tabla 3) se han obtenido de diversas fuentes, como se explica a continuación. En cuanto al factor de conversión, se han encontrado diferentes valores. Así, la U.S. Energy Information Administration considera que la incineración de una tonelada de RSU produce 474 kWh [70]. En cambio, la United States Environmental Protection Agency determina que una planta normal de incineración de RSU es capaz de generar 550 kWh por cada tonelada de

RSU [71]. Aunque los valores varían en función de la composición de los residuos, en este trabajo se ha considerado como factor de conversión el mayor valor, es decir, **0,55 kWh/Kg** de RSU incinerado. En cuanto al factor de emisión, la Fundación Ambiente y Recursos Naturales determina que la incineración de los RSU emite 1,5 veces más CO₂ que el carbón y 3 veces más que el gas natural [72]. Esta información es coherente con los valores proporcionados por la Cámara de Comercio de Aragón, puesto que el factor de emisión del carbón está en torno a los 0,40 Kg de CO₂ eq/kWh y el del gas natural en torno a los 0,20. Por lo tanto, se ha establecido que el valor del factor de emisión de los RSU es de **0,6 Kg de CO₂ eq/kWh**.

Combustible	Consumo anual	Uds de medida	Factor de conversión		kWh	Factor de emisión (Kg de CO ₂ eq/kWh)	Kg de CO ₂ eq.
Gas natural	1000	Nm3	10,7056	kWh/Nm3	10705,6	0,2016	2158,2
Gasóleo	1000	Litros	10,6	kWh/l	10600	0,2628	2785,7
Fuelóleo	1000	Kg	11,1611	kWh/Kg	11161,1	0,2736	3053,7
GLP Genérico	1000	Kg	12,6389	kWh/Kg	12638,9	0,234	2957,5
Carbón nacional	1000	Kg	5,6972	kWh/Kg	5697,2	0,4032	2297,1
Carbón de importación	1000	Kg	7,0917	kWh/Kg	7091,7	0,3564	2527,5
Gas butano	1000	Kg	12,4389	kWh/Kg	12438,9	0,2383	2964,2
RSU	1000	Kg	0,55	kWh/Kg	550	0,6	330,0

Tabla 3. Comparación entre energía generada y emisiones de CO₂ de distintas fuentes energéticas
Elaboración propia a partir de [69], [70], [71], [72].

Si se considera un consumo de mil unidades (de masa o volumen) de todos los combustibles de la Tabla 3, se observa, en primer lugar, que la cantidad de CO₂ equivalente generado (última columna) por la combustión de RSU es notablemente inferior al producido por la combustión de cualquier otra fuente de energía fósil (330 Kg de CO₂ eq. de los RSU frente a los más de 2000 Kg de CO₂ eq. de todos los demás). Sin embargo, esto se debe a que la energía generada por la incineración de cada tonelada de RSU también es muy inferior a la del resto de combustibles fósiles. Es decir, se necesita una mayor cantidad de residuos para generar la misma cantidad de energía que produciría cualquier otro combustible fósil. Así, hace falta incinerar 20 veces más cantidad de RSU que de gas natural para producir la misma energía; 13 veces más que el carbón de importación; y 10 veces más que el carbón nacional.

Otro aspecto importante que hay que tener en cuenta en el aprovechamiento energético de los RSU es que estos deben tener un factor de conversión (o valor calorífico) mínimo de 1,94 kWh/Kg para que el proceso de combustión sea

autosuficiente [68], [6]. La Tabla 4 muestra el valor calorífico aproximado de los materiales más comunes que componen los RSU.

Se observa que los materiales con un poder calorífico adecuado para su recuperación energética son el plástico, el textil y el papel. Unos residuos que contengan mayor proporción de estos materiales, proporcionarán mayor energía al ser incinerados. Sin embargo, de acuerdo con la jerarquía de gestión de los residuos, estos materiales deben reciclarse antes que recuperarse energéticamente. Por otro lado, los residuos orgánicos, los cuales no pueden ser reciclados, no presentan un poder calorífico suficiente para su conversión a energía. Como consecuencia, si la jerarquía de gestión de los residuos estuviera totalmente asentada, la obtención de energía únicamente a partir de material orgánico no sería eficiente.

Material	Valor calorífico neto (kWh/Kg)
Plástico	9,72
Textil	5,28
Papel	4,44
Material orgánico	1,11
Vidrio	0
Metal	0
Otros materiales	3,01

Tabla 4. Valor calorífico aproximado de los materiales más comunes de los RSU [68].

Mientras dure el proceso hacia la implantación total de una economía circular, el aprovechamiento energético a partir de los residuos va a seguir siendo una opción a tener en cuenta. Por un lado el volumen de los residuos en los vertederos se reduce en un 90% con su incineración [6] y, por otro lado, se genera una cantidad de energía útil con la tasa más baja de generación de CO₂ equivalente por Kg de combustible incinerado. Además, esta tecnología de AER resulta una opción muy beneficiosa en países en vías de desarrollo, ya que estos afrontan muchos problemas en la gestión de sus RSU [73].

6.2.3.2 Combustibles para el transporte

Otra de las fuentes que más dióxido de carbono genera son los combustibles para el transporte. Las emisiones de este gas debidas a la combustión de biodiésel (que se obtiene mediante procesos de fermentación de residuos agrícolas) son similares a las producidas por cualquier otro combustible para el transporte (alrededor de los 11 kWh/Kg) [74], [75]. Sin embargo, como la producción de biodiésel procede

de las plantas y estas absorben CO_2 mediante fotosíntesis durante su crecimiento, algunos autores consideran que el balance de emisiones totales es menor [74].

7 Conclusiones

Los países desarrollados como España emiten cada año grandes cantidades de gases de efecto invernadero como consecuencia de su industrialización. Este hecho puede tener, a largo plazo, consecuencias medioambientales irreversibles tales como el aumento de la temperatura global, que puede desencadenar el temido cambio climático. Por ello, durante los últimos años se han elaborado políticas a nivel internacional que fomentan el empleo de energías renovables y la aplicación de medidas para reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera. Esta concienciación para proteger el medio ambiente de prácticas insostenibles, como el depósito de los RSU en vertederos, supone un impulso para el desarrollo de nuevas tecnologías capaces de afrontar la gestión de los residuos. En este sentido, las tecnologías de AER no solo suponen un acierto para los países industrializados, también lo son para aquellos países en vías de desarrollo, donde la existencia de vertederos no controlados y la escasez energética plantea graves problemas sociales y medioambientales.

Tras la realización de este análisis, cabe destacar que las tecnologías de AER no pueden reemplazar completamente a los métodos de obtención de energía tradicionales. Sin embargo, mientras dure la transición del modelo económico lineal al modelo económico circular, supone una buena alternativa para reducir el tamaño de los vertederos a la vez que se genera una energía semirrenovable cuyas emisiones de CO₂ son reducidas en relación al volumen quemado. Otras tecnologías de AER como la pirólisis y la gasificación son también muy provechosas porque de ellas se obtienen combustibles como el gas de síntesis y subproductos útiles en otros ámbitos; o la digestión anaeróbica y la fermentación de residuos agrarios, de la cuales se obtienen combustibles como el biogás y el bioetanol y fertilizantes como el digestato.

Por lo que respecta a España, será imprescindible tomar ejemplo de otros países de su entorno para acortar las distancias en cuanto a reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera. La solución pasa por potenciar otras opciones más beneficiosas de tratamiento de residuos, como la prevención, la reutilización y el reciclaje, así como seguir apoyando el desarrollo de las tecnologías de aprovechamiento energético.

8 Anexos

Anexo A

Generación de residuos por actividades económicas y domésticas en la Unión Europea (2016). Elaboración propia a partir de Eurostat [7].

Actividad económica	Cantidad (T)
RSU	214.420.000
Actividades agrícolas, forestales y pesca	20.690.000
Minería y canteras	632.980.000
Fabricación	260.930.000
Energía	86.550.000
Aguas residuales	253.610.000
Construcción	923.910.000
Servicios	142.020.000
Total	2.535.110.000

Anexo B

Número de instalaciones de incineración existentes en Europa y la cantidad de toneladas de RSU tratadas en el año 2016. Elaboración propia a partir de Ceweb [76].

Países	Plantas de Incineración	Total RSU Incinerado (millones de T)
Alemania	121	26
Francia	126	14,4
Italia	41	6,21
Reino Unido	46	10,07
Países Bajos	12	7,8
España	12	2,88
Suecia	34	5,99
Dinamarca	26	3,47
Bélgica	18	3,41
Austria	11	2,5
Portugal	4	1,2
Finlandia	8	1,47
República Checa	4	0,7
Hungría	1	0,35
Eslovaquia	2	0,29
Luxemburgo	1	0,16
Polonia	5	0,5
Irlanda	1	0,23

Anexo C

Cantidad de RSU generados en la Comunidad Valenciana entre 2010 y 2015.
Elaboración propia a partir de datos del INE [60]

Año	Cantidad (kg/hab/año)
2010	462,0
2011	444,2
2012	429,8
2013	431,2
2014	437,9
2015	443,6

Anexo D

Cantidad de residuos generados en España en 2012 y su AER en función del material (T/año). Elaboración propia a partir de datos de Eurostat [61].

Tipo de residuo	T/año en 2012	Con recuperación energética
Madera	1.247	3
Plástico	2.065	345
Papel	3.599	0
Textil	77	2,277
Neumáticos	219	0
Aceites	169	76
Residuos Químicos	861	65
Residuos Mixtos	2.021	194

Anexo E

Tratamiento de los RSU en España entre 2008 y 2016 (miles de T). Elaboración propia a partir de datos de Eurostat [61].

Año	Total (miles T/año)	Reciclaje	Recuperación energética	Depósito en vertedero
2008	25,32	10,05	2,17	13,09
2009	25,11	8,34	2,24	14,54
2010	23,77	6,94	2,04	14,79
2011	22,67	6,05	2,34	14,28
2012	21,90	6,53	2,11	13,26
2013	21,18	6,88	2,49	11,80
2014	20,84	6,42	2,39	12,02
2015	21,16	6,35	2,69	12,13
2016	20,59	6,11	2,80	11,68

Anexo F

Porcentaje de RSU depositados en vertederos en España entre 2008 y 2016.
Elaboración propia a partir de Eurostat [61].

Año	% RSU en vertederos
2008	51,7
2009	57,9
2010	62,2
2011	63,0
2012	60,5
2013	55,8
2014	57,7
2015	57,3
2016	56,7

Anexo G

Tratamiento de RSU en Europa entre 2008 y 2016. Elaboración propia a partir de datos de Eurostat [61].

Año	Total (miles de T/año)	Reciclaje	Recuperación Energética	Depósito en vertedero
2008	261,09	95,30	54,83	100,92
2009	257,09	95,89	55,57	98,16
2010	254,00	97,03	57,54	93,30
2011	250,42	98,16	60,05	86,18
2012	245,24	100,79	59,46	78,70
2013	242,20	101,00	61,78	73,40
2014	242,90	105,42	64,22	67,84
2015	244,82	109,19	64,91	64,07
2016	246,52	111,67	68,10	60,25

Anexo H

Emisiones de gases de efecto invernadero en España entre 2010 y 2017 en miles de toneladas de CO₂ equivalente. Fuente propia a partir de informe de la Secretaría Confederal de Medio Ambiente y Movilidad de CCOO [64].

Año	Emisiones de GEI en miles de T de CO ₂ equivalente
2007	403157,27
2008	370116,58
2009	331130,61
2010	315432,16
2011	316539,01
2012	312764,35
2013	283335,74
2014	282783,85
2015	293802,39
2016	283961,88
2017	298465,52

1 Molécula de	Tiene el mismo efecto que	Moléculas de CO ₂
CH ₄		21
N ₂ O		310
HFC		11700
PFC		6500 - 9200
SF ₆		23900

Anexo I

Fuentes de producción de gases de invernadero sobre un total de 298,47 millones de toneladas de CO₂ equivalente. Se muestra también el gas absorbido por la vegetación [64].

Evolución emisiones de GEI por sectores en miles de toneladas de CO ₂ equivalente (2017)	
Energía	258762,46
Procesos Industriales	32572,54
Agricultura	34396,74
Usos del suelo y forestal	-41648,42
Residuos	14382
Total	298465,32

Anexo J

Emisiones de gases de efecto invernadero en España en 2017 en miles de toneladas de CO₂ equivalente [64].

Emisiones de GEI en España año 2017 en miles de toneladas de CO₂ equivalente	
Gas	Cantidad
Dióxido de carbono (CO₂)	276123,08
Metano (CH₄)	37176,43
Óxido nitroso (N₂O)	16476,36
Carburo hidrofluorado (HFC)	9087,26
Carburo perfluorado (PFC)	89,74
Hexafluoruro de azufre (SF₆)	226,32
Total	339179,19

Anexo K

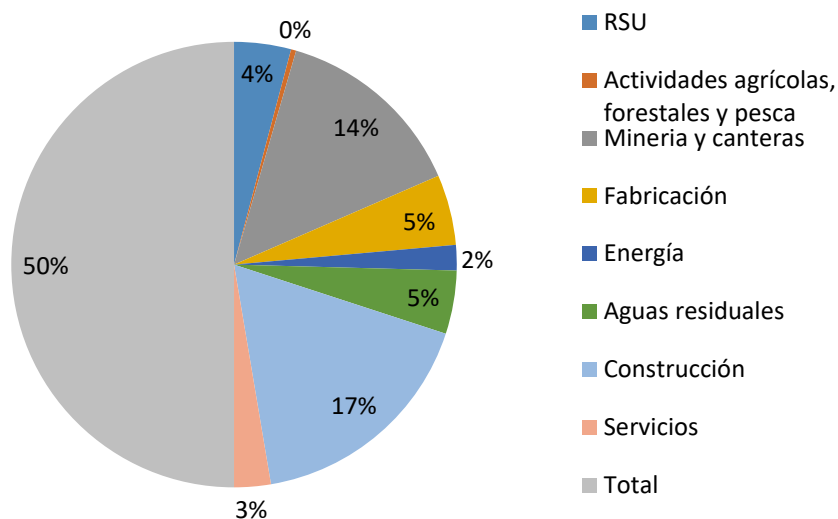
Recogida de residuos sólidos urbanos por tipo, en España y en la Comunidad Valenciana en 2015, en miles de T [77].

Tipo de Residuo	Total España	Total Comunidad Valenciana
Total	21646,3	2187,4
Residuos Mezclados	17753,5	1910,2
Vidrio	755,6	80,9
Papel y Cartón	1009	54
Envases Mixtos	592,4	42,2

Anexo L

Generación de residuos en función de la actividad económica en Europa en 2014, en T. Elaboración propia a partir de Eurostat [78].

Actividad económica	Cantidad (Tn)
RSU	207.610.000
Actividades agrícolas, forestales y pesca	18.760.000
Minería y canteras	703.190.000
Fabricación	257.070.000
Energía	92.630.000
Aguas residuales	231.270.000
Construcción	871.530.000
Servicios	133.590.000
Total	2.515.650.000



Anexo M

Tabla comparativa entre las ventajas y desventajas de las tecnologías AER.

Tecnología AER	Ventajas	Desventajas
Incineración	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Es el sistema más adecuado para residuos con alto poder calorífico. ▪ Producción de energía o calefacción directa. ▪ Se trata de un sistema relativamente silencioso e inodoro. ▪ Se puede ubicar dentro de los límites de la ciudad, lo que reduce los costes de transporte de los RSU a la planta [12]. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Es el menos adecuado para residuos líquidos. Tiene alto contenido de humedad, bajo poder calorífico o residuos clorados. ▪ Concentración de metales tóxicos en las cenizas. ▪ Alto coste de implantación, de operación y mantenimiento. ▪ Personal cualificado necesario. ▪ La eficiencia general de las centrales pequeñas es baja [12].
Pirólisis y Gasificación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Producción de combustible que puede ser utilizado para diversas finalidades. ▪ contaminación más controlable que mediante la incineración [12]. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La recuperación de energía puede verse afectada en residuos con humedad elevada. ▪ La alta viscosidad del aceite de pirólisis es problemática para su combustión [12].

Tecnología AER	Ventajas	Desventajas
Conversión Bioquímica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recuperación de energía con producción de fertilizantes de alta calidad. ▪ El sistema cerrado que permite atrapar el gas producido para su uso. ▪ Controla las emisiones de gases de efecto invernadero. ▪ Libre de malos olores y amenazas de plagas. ▪ El diseño compacto necesita menos superficie de terreno. ▪ beneficioso para el medio ambiente debido a sus bajas o insignificantes emisiones a la atmósfera. ▪ En los procesos de digestión anaeróbica se genera un subproducto que es adecuado para la tierra. ▪ Se puede hacer en pequeña escala [12], [18]. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No apto para residuos con bajo contenido en materia orgánica. ▪ La recolección de una gran cantidad de materias primas orgánicas no contaminadas adecuadas puede suponer un reto. ▪ Requiere segregación de residuos para mejorar la eficiencia de la digestión [12], [18].

Tecnología AER	Ventajas	Desventajas
Depósito en vertedero	<ul style="list-style-type: none">▪ Opción de menor coste.▪ El gas producido puede ser utilizado para la generación de energía o para otras aplicaciones térmicas.▪ No se requiere personal cualificado.▪ Puede convertir terrenos pantanosos en áreas útiles [12].	<ul style="list-style-type: none">▪ La escorrentía superficial durante las lluvias causa contaminación.▪ El suelo y las aguas subterráneas pueden contaminarse.▪ Produce sólo entre el 30% y el 40% del total de gas generado.▪ Se requiere una gran superficie de terreno.▪ Costes significativos de transporte.▪ Pueden producirse explosión espontánea debido a la acumulación de gas metano [12].

9 Referencias

- 4 Waste Removals, «There are 5 types of waste, do you know them all?,» [En línea]. Available: <https://4waste.com.au/rubbish-removal/5-types-waste-know/>.
- 1] Department for Environment, Food and Rural Affairs, «Guidance on applying the Waste Hierarchy,» Department for Environment, Food and Rural Affairs, The Stationery Office, Londres, 2011.
- J. Gertsakis, «Sustainability and the waste management hierarchy,» EcoRecycle
- 3] Victoria, 2003.
- Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino., «Plan Nacional Integral de Residuos (PNIR),» Boletín Oficial del Estado, Madrid, 2009.
- 4] J. M. Links, «Municipal, Industrial, and Hazardous Waste,» Johns Hopkins Bloomberg School of Public health, 2006.
- 5] World Energy Council, «World Energy Resources. Waste to Energy,» 2016.
- 6] Eurostat, «Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity,» 10 septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat>. [Último acceso: 15 septiembre 2018].
- 7] M. Artaraz, «La gestión de los residuos municipales en España: ¿vamos por el buen camino?,» *Revista Española de Control Externo*, vol. 14, nº 40, pp. 79-104, 2012.
- 8] Eurostat, «Municipal waste,» 2018. [En línea]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/waste/transboundary-waste-shipments/key-waste-streams/municipal-waste>. [Último acceso: 20 septiembre 2018].
- 9] D. Hoornweg, «What a waste: a global review of solid waste management,» The World Bank, Washington, 2012.
- 10] Eurostat, «Municipal waste statistics - Statistics Explained,» [Online]. Available: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Municipal_waste_statistics#Municipal_waste_generation.
- 11] A. Tozlu, «Waste to energy technologies for municipal solid waste management in

12] Gaziantep,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, vol. 54, pp. 809-815, 2016.

J. Sanderson, «Waste to energy,» *Proceedings of the Royal Society of Victoria*,
13] vol. 126, nº 2, pp. 32-33, 2014.

A. Lansink, «Challenging Changes: Connecting Waste Hierarchy and Circular
14] Economy,» *Waste Management & Research*, vol. 36, nº 10, p. 872, 2018.

N. B. Klinghoffer y M. J. Castaldi, *Waste to energy conversion technology*,
15] Elsevier, 2013.

Asociación para el Reciclado de Productos de Aluminio (Arpal), «Reciclado de
16] aluminio: formación de formadores,» Madrid, Noviembre 2013.

Department for Environment, Food & Rural Affairs, «Energy from Waste: A Guide
17] to the Debate,» Department for Environment, Food and Rural Affairs, The
Stationery Office , Londres (RU), 2014.

European Commission, «Towards a better exploitation of the technical potential of
18] waste-to-energy,» Joint Research Center, Seville, 2016.

E. Coats, «Unemployment and the circular economy in Europe: a study of
19] opportunities in Italy, Poland and Germany.,» Green Alliance, Londres, 2015.

M. Geissdoerfer, «The Circular Economy - A new sustainability paradigm?,»
20] *Journal of Cleaner Production*, pp. 1-12, 2016.

European Commission, «Paquete sobre la economía circular: preguntas y
21] respuestas,» 2 Diciembre 2015. [En línea]. Available: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_es.htm. [Último acceso: 16 Agosto 2018].

P. Lacy, *Waste to Wealth*, London: Palgrave Macmillan UK, 2015.
22]

Residuos Profesional, «LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS,
23] CLAVE PARA UNA ECONOMÍA BAJA EN CARBONO,» 5 Noviembre 2015. [En
línea]. Available: <https://www.residuosprofesional.com/gestion-residuos-economia-baja-carbono/>. [Último acceso: 10 Octubre 2018].

Comisión Europea, «Una economía baja en carbono para 2050,» [En línea].

- 24] Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_es. [Último acceso: 10 Octubre 2018].
- J. Escobar, «Capítulo 8. Generación de energía a partir de los residuos sólidos urbanos,» de *Bioenergía: fuentes, conversión y sustentabilidad.*, Bogotá, CYTED, 2014, pp. 275-296.
- C. Martinez, «Plataforma Urbana,» 3 marzo 2017. [En línea]. Available: <http://www.plataformaurbana.cl/archive/2017/03/03/copenhagen-abrira-una-planta-que-convertira-la-basura-en-energia-y-tendra-una-pista-de-ski-en-el-techo>. [Último acceso: 21 agosto 2018].
- E. Koefoed, «Magasinet KBH,» 24 septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.magasinetkbh.dk/indhold/copenhill-tagpark>. [Último acceso: 29 agosto 2018].
- Health Care Without Harm, «Pirólisis, una técnica de tratamiento térmico no tradicional».
- «Residuos Profesional,» 10 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.residuosprofesional.com/planta-valencia-residuos-biodiesel/>. [Último acceso: 23 Agosto 2018].
- J. Escobar, «Capítulo 4: Procesos biológicos de conversión.,» de *Bioenergía: fuentes, conversión y sustentabilidad.*, Bogotá, CYTED, 2014, pp. 123-164.
- D. Moratorio, «Conversión de residuos sólidos urbanos en energía.,» *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, nº 10, pp. 115-126, 2012.
- D. McCollum, «Connecting the sustainable development goals by their energy inter-linkages.,» *Environmental Research Letters*, vol. 13, nº 3, pp. 1-23, 2018.
- O. Dada, «Energy from waste: A possible way of meeting goal 7 of the sustainable development goals,» *ScienceDirect*, vol. 5, pp. 10577-10584, 2018.
- Comisión Europea, «COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES: El papel de la transformación de los residuos en energía,» 26 01 2017. [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:52017DC0034&from=EN>. [Último acceso: 16

Agosto 2018].

Comisión Europea, «COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO
35] EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y
AL COMITÉ DE LAS REGIONES: Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE
para la economía circular,» Bruselas, 2 de diciembre de 2015.

Comisión Europea, «Comisión Europea: Mercado Interior, Industria,
36] Emprendimiento y PYMES,» 16 Enero 2018. [En línea]. Available:
https://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability/circular-economy_es. [Último
acceso: 20 Agosto 2018].

Comisión Europea, «European Commission. Press Release Database: Paquete
37] sobre la economía circular: preguntas y respuestas,» 2 Diciembre 2015. [En línea].
Available: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_es.htm. [Último
acceso: 21 Agosto 2018].

Comisión Europea, «Commission and its priorities,» 26 Enero 2017. [En línea].
38] Available: [https://ec.europa.eu/energy/en/news/producing-energy-waste-new-eu-](https://ec.europa.eu/energy/en/news/producing-energy-waste-new-eu-guidance-published)
[guidance-published](https://ec.europa.eu/energy/en/news/producing-energy-waste-new-eu-guidance-published). [Último acceso: 21 Agosto 2018].

«European Commission. Press Release Database,» 26 Enero 2017. [En línea].
39] Available: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-17-104_es.htm. [Último acceso:
21 Agosto 2018].

Comisión Europea, «Crecimiento. Mercado Interior, Industria, Emprendimiento y
40] Pymes: Circular economy,» 16 enero 2018. [En línea]. Available:
https://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability/circular-economy_es. [Último
acceso: 22 agosto 2018].

European Commission , «Circular Economy: Commission delivers on its promises,
41] offers guidance on recovery of energy from waste and works with EIB to boost
investment,» 26 enero 2017. [En línea]. Available: [http://europa.eu/rapid/press-](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-17-105_en.htm)
[release_MEMO-17-105_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-17-105_en.htm). [Último acceso: 27 agosto 2018].

Diario Oficial de la Unión Europea, «DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO
42] EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y
por la que se derogan determinadas Directivas,» 22 de noviembre de 2008.

Comisión Europea, «PAQUETE SOBRE LA UNIÓN DE LA ENERGÍA,» 25 febrero

- 43] 2015. [En línea]. Available: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:1bd46c90-bdd4-11e4-bbe1-01aa75ed71a1.0011.03/DOC_1&format=PDF. [Último acceso: 21 Agosto 2018].
- Comisión Europea, «COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO
- 44] EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES: Hacia la consecución de una movilidad de bajas emisiones,» Bruselas, 8 de noviembre 2017.
- Comisión Europea, «Climate Action: Paris Agreement,» [En línea]. Available:
- 45] https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en. [Último acceso: 16 septiembre 2018].
- Comisión Europea, «Hacia la consecución de una movilidad de bajas emisiones,»
- 46] Bruselas, 2017.
- Naciones Unidas, «Acuerdo de París,» París, 2015.
- 47]
- Comisión Europea, «El papel de la transformación de los residuos en energía,» 26
- 48] Enero 2017. [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:52017DC0034&from=EN>. [Último acceso: 23 Agosto 2018].
- WI, «Assessment of waste incineration capacity and waste shipments in Europe,»
- 49] Centro Temático Europeo sobre Residuos y Materiales en una Economía Verde, 2016.
- Gobierno de España, «España Circular 2030: Estrategia Española de Economía
- 50] Circular,» Febrero 2018.
- Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía, « Plan de Energías
- 51] Renovables (PER) 2011-2020,» Madrid, 2011.
- Diario Oficial de la Unión Europea, «DIRECTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO
- 52] EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE,» 23 abril 2009. [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32009L0028>. [Último acceso: 13 septiembre 2018].

Energías Renovables: el periodismo de las energías limpias, «Biogás, el gran
53] olvidado de la transición energética,» 9 abril 2018. [En línea]. Available:
[https://www.energias-renovables.com/biogas/biogas-el-gran-olvidado-de-la-](https://www.energias-renovables.com/biogas/biogas-el-gran-olvidado-de-la-transicion-20180409)
transicion-20180409. [Último acceso: 17 septiembre 2018].

Proposición de Ley de Cambio Climático y Transición Energética., 2018.
54]

Energías Renovables, «Energías Renovables,» 12 Junio 2018. [En línea].
55] Available: [https://www.energias-renovables.com/panorama/habra-ley-de-cambio-](https://www.energias-renovables.com/panorama/habra-ley-de-cambio-climatico-y-transicion-20180711)
climatico-y-transicion-20180711. [Último acceso: 10 Octubre 2018].

Síndic de Comptes, «Auditoria operativa sobre tratamiento y eliminación de
56] residuos sólidos urbanos,» 2012.

T. Torregrosa, «Agua, Agricultura y Residuos Sólidos Urbanos,» *Información*, pp.
57] 18-21, 26 Septiembre 2017.

Generalitat Valenciana, «Residuos Urbanos,» Valencia, 2011.
58]

B. F., «Levante. El mercantil valenciano,» 05 Agosto 2018. [En línea]. Available:
59] [https://www.levante-emv.com/comunitat-valenciana/2018/08/06/generalitat-](https://www.levante-emv.com/comunitat-valenciana/2018/08/06/generalitat-modifica-ley-residuos-mantiene/1753369.html)
modifica-ley-residuos-mantiene/1753369.html. [Último acceso: 18 Agosto 2018].

Instituto Nacional de Estadística, «Indicadores sobre residuos urbanos. Serie
60] 2010-2015,» [En línea]. Available:
<http://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?path=/t26/p069/p01/&file=02001.px>. [Último
acceso: 25 Agosto 2018].

European Commission, «Eurostat,» [En línea]. Available:
61] <https://ec.europa.eu/eurostat>. [Último acceso: 25 Agosto 2018].

Secretaría de Estado de Energía, «Libro de la Energía en España 2016,» Madrid,
62] 2017.

El País, «España dispara sus emisiones de gases de efecto invernadero,» 3 abril
63] 2018. [En línea]. Available:
https://elpais.com/politica/2018/04/03/actualidad/1522751577_238586.html.
[Último acceso: 11 septiembre 2018].

Secretaria Confederal de Medio Ambiente y Movilidad de CCOO, «Evolución de
64] las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en España (1990-2017),»
Confederación Sindical de CCOO, Madrid, 2018.

Europa Press, «Europa Press,» 08 Octubre 2018. [En línea]. Available:
65] [https://www.europapress.es/sociedad/medio-ambiente-00647/noticia-greenpeace-
www-urgen-espana-aprobar-ley-cambio-climatico-transicion-energetica-ambiciosa-
20181008141520.html](https://www.europapress.es/sociedad/medio-ambiente-00647/noticia-greenpeace-www-urgen-espana-aprobar-ley-cambio-climatico-transicion-energetica-ambiciosa-20181008141520.html). [Último acceso: 10 Octubre 2018].

Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente, «Revisión del Plan
66] Integral de Residuos - 2 Residuos Urbanos,» Valencia, 2013.

United States Environmental Protection Agency, «Overview of Greenhouse
67] Gases,» [En línea]. Available: [https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-
greenhouse-gases](https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases). [Último acceso: 25 septiembre 2018].

B. Kamuk, «ISWA Guidelines: Waste to Energy in Low and Middle Income
68] Countries,» ISWA General Secretariat, Vienna, Austria, Agosto 2013.

Cámara de Comercio de Aragón, «Cálculo automático de emisiones totales en
69] relación a los consumos energéticos de sus instalaciones,» [En línea]. Available:
[https://www.camarazaragoza.com/wp-
content/uploads/2012/10/calculoemisiones.xls](https://www.camarazaragoza.com/wp-content/uploads/2012/10/calculoemisiones.xls). [Último acceso: 3 octubre 2018].

U.S. Energy Information Administration (EIA), «Biomass Explained: Waste-to-
70] Energy (Municipal Solid Waste) In Depth,» 24 enero 2018. [En línea]. Available:
https://www.eia.gov/energyexplained/?page=biomass_waste_to_energy#tab2.
[Último acceso: 3 octubre 2018].

United States Environmental Protection Agency, «Energy Recovery from the
71] Combustion of Municipal Solid Waste (MSW),» [En línea]. Available:
[https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-
msw](https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw). [Último acceso: 3 octubre 2018].

Fundación Ambiente y Recursos Naturales, «Incineración de basura con
72] recuperación de energía: una tecnología cara, sucia, y a contramano del manejo
sustentable de los recursos.,» Buenos Aires , 2018.

G. Vujic, «Barriers for implementation of “waste to energy” in developing and
73] transition countries: a case study of Serbia.,» Springer, Berlín, 2015.

U.S. Energy Information Administration, «How much carbon dioxide is produced
74] from burning gasoline and diesel fuel?,» 19 Mayo 2017. [En línea]. Available:
<https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=307&t=11>. [Último acceso: 15
Septiembre 2018].

P. Araya, «Efecto de la utilización de biodiesel sobre las emisiones de vehículos
75] pesados.,» Santiago de Chile, 2009.

Confederation of waste-to-energy plants, «Waste-to-Energy Plants in Europe in
76] 2016,» 22 Octubre 2018. [En línea]. Available:
<http://www.cewep.eu/2018/10/22/waste-to-energy-plants-in-europe-in-2016/>.
[Último acceso: 22 Octubre 2018].

Instituto Nacional de Estadística, «Estadísticas sobre la recogida y tratamiento de
77] residuos,» 2017.

Comisión Europea, «Eurostat,» [En línea]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat>.
78] [Último acceso: 25 Agosto 2018].

Naciones Unidas, «Comisión Económica para América latina y el Caribe,» [En
79] línea]. Available: [https://www.cepal.org/es/temas/agenda-2030-desarrollo-](https://www.cepal.org/es/temas/agenda-2030-desarrollo-sostenible/objetivos-desarrollo-sostenible-ods)
sostenible/objetivos-desarrollo-sostenible-ods. [Último acceso: 20 Agosto 2018].

European Parliament, «European Parliament News,» 02 Febrero 2015. [En línea].
80] Available:
[http://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/c](http://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits)
ircular-economy-definition-importance-and-benefits. [Último acceso: 10 Octubre
2018].

S. Mastrangelo, «Energía Estratégica,» 27 Enero 2016. [En línea]. Available:
81] <http://www.energiaestrategica.com/>. [Último acceso: 10 Octubre 2018].

U.S. Energy Information Administration, «Biomass Explained: Waste-to-Energy
82] (Municipal Solid Waste),» 24 Enero 2018. [En línea]. Available:
https://www.eia.gov/energyexplained/?page=biomass_waste_to_energy#tab2.
[Último acceso: 25 Septiembre 2018].

United States Environmental Protection Agency, «Energy Recovery from the
83] Combustion of Municipal Solid Waste (MSW),» [En línea]. Available:
<https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste->

msw. [Último acceso: 25 Septiembre 2018].

Comisión Europea, «Hacia una economía circular,» [En línea]. Available:
84] https://ec.europa.eu/commission/priorities/jobs-growth-and-investment/towards-circular-economy_es. [Último acceso: 20 Agosto 2018].